

13th International Conference on MOdeling, Optimization and SIMulation: "New Advances and Challenges for Sustainable and Smart Industries"

François Vernadat, Anis Chelbi, Pierre Baptiste, Ali Siadat, Lahcen Mifdal, Ilias Majdouline

▶ **To cite this version:**

François Vernadat, Anis Chelbi, Pierre Baptiste, Ali Siadat, Lahcen Mifdal, et al.. 13th International Conference on MOdeling, Optimization and SIMulation: "New Advances and Challenges for Sustainable and Smart Industries". 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM 2020, Nov 2020, Agadir, Morocco. 828 p., 2021. ⟨hal-03564820⟩

HAL Id: hal-03564820

https://hal.science/hal-03564820v1

Submitted on 10 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

UNIVERSIAPOLIS
Université Internationale d'Agadir
الجامعة الدولية لأكادير

ECOLE POLYTECHNIQUE D'AGADIR

MOSIM 20

Arts et Métiers Sciences et Technologies



13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM 2020

"New Advances and Challenges for Sustainable and Smart Industries"

12-14 November 2020

Actes de conférence

Conference proceedings





Actes de conférence / Conference proceedings

13ème Conférence Internationale

de MOdélisation, Optimisation et SIMulation

« Nouvelles avancées et défis pour des industries durables et avisées »

12-14 Novembre 2020

13th International Conference

on MOdeling, Optimization and SIMulation

"New Advances and Challenges for Sustainable and Smart Industries"

12-14 November 2020

Message du comité scientifique

Après plus de 25 ans d'existence, MOSIM'20 sera donc la dernière édition de la série des conférences internationales sur la Modélisation, l'Optimisation et la SIMulation des systèmes de production de biens ou de services, incluant les systèmes de transport, urbains et aménagement du territoire ou de santé. Créée en 1997 par M. Itmi, J.-P. Pécuchet et H. Pierreval et à l'origine essentiellement francophone, MOSIM s'est forgée au fil des années une réputation de sérieux et de qualité qui ont été le gage de son succès et de sa longévité. Elle est depuis devenue internationale, la proportion des articles en anglais finissant par dépasser celle en français, avec des contributions provenant majoritairement de France, du Canada, des pays du Maghreb et d'autres pays d'Europe de l'Ouest ou d'ailleurs. Elle a également toujours été un lieu de rencontre privilégié entre chercheurs de différentes générations traitant de la modélisation ou de la simulation tant sur les plans théorique, applicatif que méthodologique. MOSIM est également fière d'avoir permis à de nombreux jeunes chercheurs de faire leurs premiers pas dans la communauté scientifique.

Cette 13ème édition, dédiée aux *Nouvelles avancées et aux défis pour des industries durables et avisées*, ne déroge pas à la règle, malgré les difficultés rencontrées pour son organisation due à la pandémie mondiale qui marquera à jamais l'année 2020.

En effet, ce ne sont pas moins de 162 soumissions qui ont été reçues par le comité scientifique. Chaque article a été dûment évalué par au moins deux, mais majoritairement trois à quatre, relecteurs. Au final, ce sont 120 articles qui ont été acceptés pour composer le programme final, soit un taux d'acceptation de 74%. Ce dernier peut paraître élevé, mais il reflète en fait le degré élevé de qualité des articles soumis car le filtre de sélection est resté sévère. Une proportion importante de ces communications va être invitée à soumettre une version étendue des articles pour soumission aux trois revues partenaires de MOSIM'20 : *International Journal of Production Research*, *Computers in Industry* et *International Journal of Product Lifecycle Management*. Le texte des autres articles présentés lors de la conférence sera publié de façon permanente dans l'archive en ligne HAL du CNRS. Trois prix seront remis pour désigner les trois meilleurs articles de MOSIM'20.

Ce succès, MOSIM'20 le doit en grande partie aux organisateurs des 19 sessions spéciales proposées initialement et dont 14 ont pu être maintenues. Le comité scientifique de MOSIM'20 adresse donc ses plus vifs remerciements à chacun de ces organisateurs. Il remercie également très cordialement tous les auteurs qui ont proposé une soumission, contribuant ainsi au succès de l'événement. Enfin, il remercie tout particulièrement tous les collègues qui ont été sollicités pour l'assister dans le processus d'évaluation et de sélection des articles. A chacun le comité souhaite exprimer sa gratitude.

Ainsi donc s'achève le cycle des conférences MOSIM qui, à partir de 2022, doit intégrer un plus grand congrès qui devrait devenir le congrès de la communauté fédérée autour de la Société d'Automatique, Génie Industriel et Productique (SAGIP).

Anis CHELBI, Pierre BAPTISTE et François VERNADAT,

Présidents du comité scientifique

Présidents du comité d’honneur

Laurent CHAMPANEY, Aziz BOUSLIKHANE, Abdelhakim ARTIBA





Présidents du comité scientifique

François VERNADAT, Anis CHELBI, Pierre BAPTISTE





Présidents du comité d'organisation

Ali SIADAT, Lahcen MIFDAL, Ilias MAJDOULINE





Comité d'organisation

Université Internationale d'Agadir – Agadir (Maroc)

Zakaria CHEKOUBI, Oumar DICKO, Jamal ERRAISSE, Btissame ESSETTE, Hassna IKHRICHI, Mohamed MAINE.

Laboratoire Conception Fabrication Commande – Metz (France)

Xavier GODOT, Jenny MAFAYOUX.



Sessions

Session RS-1 "*Simulation et Optimisation*" / "*Simulation and Optimization*"

"*Simulation model for the decontamination of surgical instruments and analysis of automated scenarios*" by Marzieh Ghiyasinasab, Nadia Lahrichi, Nadia Lehoux, Xavier Elie-Dit-Cosaque

"*Comparative study of two classical optimization algorithms solving economic dispatch problems*" by Tawba Dridi, Houda Jouini, El-Mouloudi Dafaoui, Abderrahman El Mhamedi, Abdelkader Mami

"*Modular cost model for Quality Management*" by Jean-Yves Dantan, Alain Etienne, Ali Siadat, Mehrdad Mohammadi, Reza Tavakkoli-Moghaddam

"*Spare parts inventory control based additive manufacturing*" by Youssef Abidar, Amin Chaabane

Session RS-2 *"Planification des Besoins Matières Pilotée par la Demande" / "Demand-Driven Material Requirements Planning*"

"*Demand-Driven MRP: Literature review and research issues*" by Mustapha El Marzougui, N. Messaoudi, W. Dachry, H. Sarir, B. Bensassi

"*Corrélation entre taux de service, taux de charge et paramètres du DDMRP : Utilisation d'abaques réalisés par simulation*" by Guillaume Dessèvre, Pierre Baptiste, Jacques Lamothe

"*Modélisation et simulation d'un module d'ajustement de la capacité d'un système DDMRP*" by Guillaume Dessèvre, Maha Ben Ali

"*Modélisation et simulation d'un système DDMRP protégé par un délai tampon*" by Mahmoud Elhakam, Maha Ben Ali, Diane Riopel

Session RS-3 *"Ingénierie de Systèmes Basées sur les Modèles" / "Model-Based System Engineering"*

"*On the continuity of the swarm robot design using MBSE method and simulation*" by Khalil Alaoui, Moncef Hammadi, Thierry Soriano, Mohamed Addar

"*Adopting a model-based approach for satellite operations' diagnosis*" by Nikolena Christofi, Claude Baron, Xavier Pucel, Marc Pantel, Mathilde Machin, Christophe Ducamp

"*Investigating the use of a model-based approach to assess automotive embedded software safety*" by Yandika Sirgabsou, Claude Baron, Cyril Bonnard, Laurent Pahun, Lorenzo Grenier, Philippe Esteban

Session RS-4 *"Recherche Opérationnelle en Gestion de Production" / "Operations Research in Production Management"*

"*Programmation linéaire en nombres entiers pour l'ordonnancement de projet multi-compétence avec préemption partielle*" by Christian Artigues, Pierre Lopez, Olivier Polo Mejía

"*A Min-Max path approach for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent setup times*" by Youssef Lahrichi, Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon, Sylvie Norre

"*Un modèle de blending pour la planification dynamique d'une chaîne logistique minière*" by Mouna Bamoumen, Vincent Hovelaque, Vincent Giard

Session RS-5 ***"Planification des Matières et des Ressources / Planification de la Production" / "Material and Resource Planning / Production Planning"***

"*Modélisation et optimisation du problème de planification de type RMRP*" by Ilhem Slama, Oussama Ben-Ammar, Alexandre Dolgui, Faouzi Masmoudi

"*Multi-period multi-item lot sizing under random yield and stochastic capacity*" by Mehrnoosh Mohammadi, Simon Thévenin, Alexandre Dolgui

"*A mixed integer linear program for human and material resources optimization in emergency department*" by Ibtissem Chouba, Lionel Amodeo, Farouk Yalaoui, Taha Arbaoui, David Laplanche

"*Commande optimale de systèmes hybrides de fabrication-refabrication utilisant des installations dédiée et flexible*" by Morad Assid, Ali Gharbi, Adnène Hajji

Session RS-6 ***"Maintenance Industrielle" / "Industrial Maintenance"***

"*Diagnostic et pronostic de la maintenance basée sur la dégradation : Cas d'un système vibratoire*" by Imad El Adraoui, Hassan Gziri, Ahmed Mousrij

"*Prédictions de RUL par analyse de similarités*" by Laure Siret, Bruno Agard, Christophe Danjou, Renan Bonnard

"*Stratégie de maintenance imparfaite intégrée pour un système de production d'énergie sous variation de taux de défaillance (cas d'une éolienne)*" by Maryem Bouzoubaa, Zied Hajej, Nidhal Rezg

Session RS-7 ***"Etudes de Cas Industriels" / "Industrial Case Studies"***

"*Supply chain planning in the petroleum industry: Libyan petroleum sector case study*" by Otman Abdussalam, Julien Trochu, Nuri Fello, Amine Chaabane

"*Conception d'un SIAD pour la planification minière : Mise en oeuvre dans le contexte minier de l'extraction du phosphate*" by Najoua Alaoui, Ahlam Azzamouri, Selwa Elfirdoussi, Pierre Fenies

"*Avantages potentiels du Reverse Blending sur la chaîne logistique de l'industrie des engrais*" by Latifa Benhamou, Pierre Féniès, Vincent Giard

"*Case study of supply chain in textile industry: A dynamic product allocation decision problem*" by Alice Berthier, Hicham Chehade, Alice Yalaoui, Lionel Amodeo, Farouk Yalaoui, Christian Bouillot

Session RS-8 ***"Données de Masse / Analyse de Données" / "Big Data / Data Analytics"***

"*Fouille de données et segmentation de chroniques par extrema : considérations préliminaires*" by Michel Fliess, Cédric Join

"*Analyse topologique des structures de données : Application à la migration des systèmes d'information d'entreprise*" by François Loison, Pierre Barrios, Christophe Danjou, Benoît Eynard

Session RS-9 *"Gestion des Systèmes de Transport" / "Transportation System Management"*

"*A new bi-objective optimization model for bus priority network design*" by Jin Chen, Peng Wu, Feng Chu, Chengbin Chu

"*Assessing the reduction of empty backhauls using transshipment points*" by Jean-Sébastien Tancrez, Baptiste De Haes, Thomas Hacardiaux

"*Collaboration horizontale durable des réseaux de transport de marchandises : Etat de l'art et perspectives*" by Aymen Aloui, Ridha Derrouiche, Nadia Hamani, Laurent Delahoche

"*Service policy optimization for urban public transport networks: Mobility constraints during health emergency of pandemic cycles*" by Ronald M. Martinod, Olivier Bistorin, Leonel F. Castañeda, Nidhal Rezg

Session RS-10 *"Economie Circulaire / Développement Durable" / "Circular Economie / Sustainable Development"*

"*Portrait conceptuel de la gestion de l'énergie dans les systèmes de production*" by Thomas Hernández, Nadia Lehoux, Louis Gosselin

"*Study of symbiotic flows with economic approach*" by Mayssa Chebbi, Daniel Roy, Sophie Hennequin, Nahla Chabbah SekmaKihel

"*Simulation d'une chaîne de valeur circulaire dans le balayage de rue printanier : étude préliminaire*" by Florence Blouin, Jean-François Audy, Amina Lamghari

"*Performance evaluation of centralized maintenance workshop in the circular economy context*" by Rony Arsène Djeunang Mezafack, Maria Di Mascolo, Zineb Simeu-Abazi, Sina Akbari Haghighi

Session RS-11 *"Conception et Gestion des Chaînes Logistiques" / "Supply Chain Design and Management"*

"*A finance driven supply chain network design model*" by Hamidreza Rezaei, Nathalie Bostel, Vincent Hovelaque, Olivier Péton

"*Development of a tool for tracking organic wheat grain movements at the supply chain level*" by Loïc Parrenin, Christophe Danjou, Bruno Agard

"*Mixed integrer linear programming formulation for a multi-echelon integrated supply chain within mass customization strategy*" by Mouad Benbouja, Achraf Touil, Abdelwahed Echchatbi, Abdelkabir Charkaoui

"*Understanding the determinants of blockchain technology adoption stages and supply chain performance using the technology-organization-environment framework*" by Manal Hader, Abderrahman El Mhamedi, Abdellah Abouabdellah

Session SP-1 *"Intelligence Artificielle & Analyse de Données pour la Production 4.0" / "Artificial Intelligence & Data Analytics in Manufacturing 4.0"*

"*Improvement of sales prediction by fitted-to-product time-series models*" by Mohamed Sameh Belaid, Stéphane Lecoeuche, Anthony Fleury, Baptiste Hervé

"*Supporting strategic decision-making in Manufacturing 4.0 with mix of qualitative and quantitative data analytics*" by Dmitry Kucharavy, David Damand, Samia Gamoura, Marc Barth

"*Contribution to sales forecasting based on recurrent neural network in the context of a Moroccan company*" by Ghita Rguiga, Nabil Mouttaki, Jamal Benhra

"*De la simulation à évènement discret au Machine Learning pour la chaine logistique*" by Rachid Benmoussa

Session SP-2 *"Gestion des Risques en Logistique" / "Risk Management in Logistics"*

"*Optimisation conjointe de la planification de la production d'énergie, de la maintenance et des pièces de rechange d'un parc éolien*" by Abderrahmane Faker, Salim Bouslikhane, Zied Hajej

"*Optimal maintenance policy for equipment leased with warranty*" by Amel Ben Mabrouk, Anis Chelbi

"*Stratégie intégrée de production, maintenance et carte de contrôle d'une chaîne logistique sous contrainte de qualité*" by Aminu Sahabi Abubakar, Aime Nyoungue, Zied Hajej

"*Etude des critères d'optimisation pour la replanification des chaînes d'assemblage aéronautiques*" by Damien Lovato, Romain Guillaume, Caroline Thierry, Olga Battaïa

"*Towards a predictive maintenance based on ultrasonic guided waves non-destructive testing technique: A case study*" by Mohamed Sfar, Slah Yaacoubi, Sofiene Dellagi, Mahjoub El Mountassir, Sadok Turki

"*Maritime risks taxonomy: A structured literature review of maritime risk factors classification*" by Cheik Aboubakar Ouedraogo, Sina Namakiaraghi, Cédric Rosemont, Aurélie Montarnal, Didier Gourc

"*Stratégie de maintenance optimale d'une station de panneaux solaires sur un horizon de temps fini*" by Safouane Elkouiri, Lahcen Mifdal, Sofiene Dellagi, Anis Chelbi

"*Optimal design of a leased vehicle fleet with consideration of maintenance and environmental constraints*" by Malek Ben Mechlia, Jérémie Schutz, Sofiene Dellagi, Anis Chelbi

Session SP-3 *"Gestion des Risques et Evaluation de Performance" / "Risk Management and Performance Assessment"*

"*Holistic management of risks for road tunnels*" by Konstantinos Kirytopoulos, Emmanouil Dermitzakis, Panagiotis Ntzeremes, Georgios Chatzistelios

"*Risk-based simulation tool for prediction of process influence on product performances*" by Jelena Petronijevic, Alain Etienne, Ali Siadat

"FVMEARA: *A new systematic approach for security and safety risk co-assesment based on ICVSS methodology*" by Riad Chemali, Blaise Conrard, Mireille Bayart

"*Système à base de connaissances pour aider l'ingénierie des risques en réponse à appel d'offres*" by Elise Vareilles, Thierry Coudert, Michel Aldanondo, Laurent Geneste, Delphine Guillon, Rania Ayachi

Session SP-4 ***"Indicateurs Clés de Performance 4.0 et Dynamique de Prise de Décision" / "4.0 Key Performance Indicators and Decision-Making Dynamics***"

"*Framework of performance measurement and management for Industry 4.0 era*" by Liaqat Ali Shah, Fahd Amjad, François Vernadat

"*Impact d'une expression de performance élémentaire sur l'expression de performance agrégée : une approche par l'intégrale de Choquet*" by Lamia Berrah, V. Clivillé, V. Verjus, R. Gandia

"*Modularity of RMS: What about the aggregation?*" by Erica Capawa Fotsoh, Pierre Castagna, Nasser Mebarki, Pascal Berruet

"*A framework for developing a performance measurement system in healthcare: A case study in Montreal*" by Anes Ben Fradj, Tasseda Boukherroub, Claude Olivier

"*Usage de pénalités dans les modèles économiques de management industriel*" by Najat Bara, Frédéric Gautier, Vincent Giard

"*Modélisation du programme directeur de production en vue de la transition numérique des PME manufacturières*" by Estéfania Tobon Valencia, Samir Lamouri, Robert Pellerin, Alexandre Moeuf

"*Linking 4.0 technologies and performance indicators based on a reference model for supply chain*" by Yousra El Kihel, Aicha Amrani and Yves Ducq

"*Utilisation des approches de l'industrie 4.0 et de l'Internet physique pour le déploiement des entrepôts urbains*" by Aurélie Édouard, Samir Lamouri, Virginie Fortineau, Yves Sallez, Alexandre Berger

Session SP-5 ***"Logistique Maritime" / "Marine Logistics"***

"*Modélisation du problème de l'allocation des planches et des postes à quai dans les ports vraquiers*" by Hamza Bouzekri, Gülgün Alpan, Vincent Giard

"*Simulation of a digital shadow in a port*" by Erik Bergeron, Jean-François Audy, Pascal Forget

"*Study of the impact of quay crane productivity rate on berth and quay crane assignment and scheduling*" by Kaoutar Chargui, Tarik Zouadi, Abdellah El Fallahi, Mohamed Reghioui

"*Stakeholders' analysis in LNG bunkering: An integral part of risk management process*" by Evangelos Bellos, George Chatzistelios, Angeliki Deligianni, Vrassidas Leopoulos

Session SP-6 ***"Territoire et Logistique : Un Système Complexe" / "Territory and Logistics: A Complex System"***

"*Smart ports design features analysis: A systematic literature review*" by Sahbia Bessid, A. Zouari, A. Frikha, A. Benabdelhafid

"*The complexity of the territorial logistics ecosystem*" by Ebtissem Sassi, Abdellatif Benabdelhafid

" *Ports and spatial planning: An exploratory study in the Morrocan context*" by Ouafae Zerouali Ouariti, El Mehdi Jebrane

Session SP-7 ***"Nouvelles Avancées et Applications de la Logique Floue en Production Durable et en Logistique" / "Recent Advances and Fuzzy-Logic Applications in Sustainable Manufacturing and Logistics"***

"*Multi-objective process and production planning integration in reconfigurable manufacturing environment: Augmented e-constraint based approach*" by Mohammad Amin Yazdani, Lyes Benyoucef, Amirhossein Khezri, Ali Siadat

"*Evaluation environnementale couplée à l'analyse multidimensionnelle des données pour l'économie circulaire*" by Nancy Prioux, Rachid Ouaret, Zirul Chen, Gilles Hêtreux et Jean-Pierre Bélaud

"*Evaluation de l'incertitude pour l'aide à la replanification en horizon glissant d'une chaîne logistique*" by Sanaa Tiss, Jacques Lamothe, Caroline Thierry

"*Big data for supply chain management in Industry 4.0 context: A comprehensive survey*" by Lahcen Tamym, Moulay Driss El Ouadghiri, Lyes Benyoucef, Ahmed Nait Sidi Moh

Session SP-8 ***"Gestion des Soins de Santé" / "Health Care Management"***

"*Déploiement des véhicules de secours et d'assistance aux victimes en tenant compte de l'optimisme du décideur*" by Oussama Ben-Ammar, Romain Guillaume, Caroline Thierry

"*Modeling patient flow in the emergency department using machine learning and simulation*" by Emad Alenany, Abdessamad Ait El Cadi

"*Resources scheduling in the emergency department using simulation in disaster conditions: Case of COVID-19*" by Ibrahim Cheaitou, Abdessamad Ait El Cadi, Abdelghani Bekrar, David Duvivier, Anwar Sahili

"*Complexité de la chaîne logistique hospitalière et du Covid-19 : vers une modélisation multi-agents*" by Ahmed Chtioui, Imane Bouhaddou, Abla Chaouni Benabdellah, Asmaa Benghabrit

"*A multi-objective approach for the combined master surgical schedule and surgical case assignment problems*" by Salma Makboul, Said Kharraja, Abderrahman Abbassi, Ahmed El Hilali Alaou

"*An approach for outpatient multi-appointment booking optimization problem with strict time-lag and variable resources constraints*" by Quoc Nhat Han Tran, Hicham Chehade, Nhan Quy Nguyen, Frédérick Dugardin

"*A three-stage approach for the multi-period green home health care problem with varying speed constraints*" by Salma Makboul, Said Kharraja, Abderrahman Abbassi, Ahmed El Hilali Alaou

"*A collaborative supply chain network design within a territory hospital group*" by Khouloud Dorgham, Issam Nouaouri, Jean-Christophe Nicolas, Gilles Goncalves

Session SP-9 *"Ingénierie Organisationnelle et Gestion de la Continuité de Service des Systèmes de Santé dans l'Ere de la Transformation Numérique de la Société" / "Organizational Engineering and Management of Business Continuity of Healthcare Systems in the Era of Numerical Society Transformation"*

"*Business planning for home care and services*" by Alois Franzino, Thibaud Monteiro, Maria Di Mascolo,

"*Sharing a ride time constraint in a multi-trip dial-a-ride problem. An application to the non-urgent patient transportation problem*" by Timothée Chane-Haï, Samuel Vercraene, Thibaut Monteiro

"*Retour d'expériences en ingénierie des parcours de patients en situation complexe*" by Hervé Pingaud, Elyes Lamine

"*Un système socio-cyber physique basé sur un réseau-infocentré pour la collecte mobile de sang*" by Ikram Ghernaout, Linda Elmhadhbi, Mohamed Hedi Karray, Bernard Archimède

Session SP-10 *"Planification et Commande de la Production pour l'Industrie 4.0" / "Production Planning and Control for Industry 4.0"*

"*Economic assessment of ramp-up strategies in multi-variant production*" by Antoine Pierné, Khaled Medini, Malek Masmoudi

"*Optimal integration of product configuration and process planning to meet individual customer requirements in mass customization*" by Rachel Campos Sabioni, Joanna Daaboul, Julien Le Duigou

"*A joint model for optimal capacitated multi-level lot-sizing and financing of the working capital requirement under delays in payments*" by Sabah Belil, Pierre Fenies, Asma Rakiz, Nikolay Tchernev

"*Time-indexed formulations for the order acceptance scheduling problem under energy aspects*" by Mariam Bouzid, Oussama Masmoudi, Alice Yalaoui

"*Toward application of real-time video streams in production planning and control: A conceptual framework*" by Marjan Padidar, Samira Keivanpour, Maha Ben Ali

"*Value stream mapping 4.0: A structural modeling approach*" by Rania El Kammouni, Oualid Kamach, Malek Masmoudi

"*Modélisation de contrôleurs discrets pour l'Industrie 4.0*" by Armand Toguyeni

"*Jumeau numérique : Approche pour le maintien d'un inventaire géolocalisé en temps réel d'une cour à bois*" by Sébastien Nantel, Jonathan Gaudreault, François Léger

Session SP-11 *"Optimisation des Systèmes de Production dans le Contexte 4.0 Utilisant l'Amélioration Continue" / "Production System Optimization in 4.0 Context Using Continuous Improvement"*

"*Simulation d'une salle de tissage : impact du nombre de tisserands sur les temps d'arrêt des machines et sur les retards de production*" by Ludwig Dumetz, Jonathan Gaudreault, Pascal Forget

"*Dynamic scheduling through mathematical and simulation approach in the context of Industry 4.0*" by Mojtaba Ebrahimi, Behnam Einabadi, Armand Baboli, Eva Rother

"*Risk and decision analysis for reconfigurable assembly system design under uncertainties"* by Amélie Beauville Dit Eynaud, Nathalie Klement, Lionel Roucoules, Olivier Gibaru, Laurent Durville

"*A conceptual framework for asset management 4.0"* by Mbarek El Bounjimi, G Abdul-Nour

Session SP-12 *"Défis pour la Conception des Systèmes de Production Cyber-Physiques" / "Challenges for the Design of Cyber Physical Production Systems"*

"*Recursive hybrid control architecture to deal with reactivity in the context of Industry 4.0"* by Tsegay Tesfay Mezgébé, Hind Bril El Haouzi

"*Function analysis of Manufacturing Execution Systems (MES) in Cyber Physical Production Systems (CPPS)"* by Xuan Wu, Virginie Goepp, Ali Siadat

"*Predictive maintenance based on decentralized CPS and convolution's neural network"* by Baudoin Dafflon, Mohand-Lounes Bentaha, Nejib Moalla, Alexandre Benbouriche

"*Revue des méthodes d'évaluation des contraintes ergonomiques des opérations de production et de leur intégration dans un système de production cyber-physique"* by Nicolas Murcia, Olivier Cardin, Abdelmoula Mohafid

Session SP-13 *"Production Avisée et Développement Durable" / "Smart Manufacturing and Sustainable Development"*

"*Proposed overall performance indicators for sustainable manufacturing management in mining industry"* by Aicha Lamjahdi, Hafida Bouloiz, Maryam Gallab

Gestion de l'énergie et de la demande de pointe en puissance dans l'industrie : Revue de littérature" by Imen Chaabouni, Nadia Lehoux, Louis Gosselin, Hugues Fortin

"*Lean 4.0 serving the industry of the future"* by Rachida Abbou, Zineb Mouhib, Lina Naciri, Mohssine Nali, Abdoudrahmane Sekoun Kébé, Maryam Gallab

"*CO_2 emission's study of the hydrocarbon supply chain aiming for resources pooling strategy"* by Youness El Bouazzaoui, Mourad Abouelala, Abdoudrahmane Sekoun Kébé, Fayçal Mimouni

"*Aeronautics in the Factory 4.0 era"* by Mohssine Nali, Lina Naciri, Zineb Mouhib, Rachida Abbou, Abdourahamane Sekoun Kébé, Maryam Gallab

"*End of life management of complex products in an Industry 4.0 driven and customer-centric paradigm: A research agenda"* by Samira Keivanpour

"*L'étude de l'impact des innovations technologiques digitales sur la performance durable d'une chaîne logistique : cas du secteur halio-industriel"* by Jalila Bennouri, Ouafae Zerouali Ouariti

"*Partage de gains en mutualisation logistique : état de l'art et perspectives de recherche"* by Nassim Mrabti, Nadia Hamani, Ridha Derrouiche, Dorsaf Khammassi, Laurent Delahoche

Session SP-14 *"L'Humain dans l'Usine du Futur" / "Human in the Factory of the Future"*

"*Dimensionnement d'espaces de travail intégrant les surfaces d'usage des équipements"* by Daniela Vilanueva Caceres, Remiel Feno, Amal Mtibaa

"*Industrie du futur : aide à l'identification des phénomènes dangereux lors de la conception de machines flexibles"* by Bruno Daille-Lefèvre, Jacques Marsot, Patrick Martin

"*L'intégration des facteurs humains dans la première phase de conception : Application sur la pénibilité"* by Rémy Houssin, Oussama Lemouchi

"*Prise en compte de la santé-sécurité dans la conception et l'exploitation des systèmes reconfigurables"* by Juan Camillo Gomez EcheverriBounou, Xavier Godot, Bruno Daille-Lefèvre, Jorge Humberto Morales Aristizabal, Patrick Martin

"*Vers un cadre méthodologique de conception des systèmes humains-robots"* by Mouad Bounouar, Richard Béarée, Ali Siadat, Tahar-Hakim Benchekroun

"*L'humain dans les systèmes de production basés sur les paradigmes IoT et CPS : Etat des lieux et perspectives"* by Etienne Valette, Hind Bril El-Haouzi, Guillaume Demesure

"*Robotique collaborative en milieu industriel, apports de l'ergonomie dans la transformation du travail : étude en industrie sidérurgique"* by Aurélien Adam, Tahar-Hakim Benchekroun

Session SP-15 *"Ordonnancement et Prévision de Chaînes Logistiques Résilientes" / "Scheduling and Forecasting for Resilient Supply Chains"*

"*Optimisation multi-sites de l'ordonnancement des commandes et de leurs mélanges à partir de minerais extraits"* by Hajar Hilali, Vincent Hovelaque, Vincent Giard

"*Exploration des données de planification pour la modélisation des incertitudes dues à l'horizon glissant"* by Walid Khellaf, Jacques Lamothe, Romain Guillaume

"*Supply chain routing scheduling sub-model design: Case of export bulk ports"* by Sara Mallah, Afaf Aloullal, Oualid Kamach, Maled Masmoudi, Najib Najid, Khalid Kouiss, Laurent Deshayes

"*AI in supply chain performance and resilience: A literature review"* by Mariam Atwani, El Hassan Laaziz, Mustapha Hlyal, Jamila El Alami

MOSIM Agadir 2020 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation

Best Papers Awards

11 Papers preselected:

MOSIM Agadir 2020 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation

- Supporting strategic decision-making in Manufacturing 4.0 with mix of qualitative and quantitative data analytics by Dmitry Kucharavy, David Damand, Samia Gamoura, Marc Barth
- Optimal maintenance policy for equipment leased with warranty by Amel Ben Mabrouk and Anis Chelbi
- Programmation linéaire en nombres entiers pour l'ordonnancement de projet multi-compétence avec préemption partielle by Christian Artigues, Pierre Lopez, Olivier Polo Mejía
- A Min-Max path approach for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent setup times by Youssef Lahrichi, Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon, Sylvie Norre
- An approach for outpatient multi-appointment booking optimization problem with strict time-lag and variable resources constraints by Quoc Nhat Han Tran, Hicham Chehade, Nhan Quy Nguyen, Frédérick Dugardin
- Retour d'expériences en ingénierie des parcours de patients en situation complexe by Hervé Pingaud, Elyes Lamine

11 Papers preselected (cont'd):

MOSIM Agadir 2020 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation

- Jumeau numérique : Approche pour le maintien d'un inventaire géolocalisé en temps réel d'une cour à bois by Sébastien Nantel, Jonathan Gaudreault, François Léger
- L'humain dans les systèmes de production basés sur les paradigmes loT et CPS : Etat des lieux et perspectives by Etienne Valette, Hind Bril El-Haouzi,Guillaume Demesure
- Portrait conceptuel de la gestion de l'énergie dans les systèmes de production by Thomas Hernández, Nadia Lehoux, Louis Gosselin
- Lean 4.0 serving the industry of the future by Rachida Abbou, Zineb Mouhib, Lina Naciri, Mohssine Nali, Abdoudrahmane Sekoun Kébé, Maryam Gallab
- Partage de gains en mutualisation logistique : état de l'art et perspectives de recherche by Nassim Mrabti, Nadia Hamani, Ridha Derrouiche, Dorsaf Khammassi, Laurent Delahoche

Best Papers Awards

MOSIM Agadir 2020 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation

- 1st Prize: Programmation linéaire en nombres entiers pour l'ordonnancement de projet multi-compétence avec préemption partielle by Christian Artigues, Pierre Lopez, Olivier Polo Mejía

- 2nd Prize: Portrait conceptuel de la gestion de l'énergie dans les systèmes de production by Thomas Hernández, Nadia Lehoux, Louis Gosselin

- 3rd Prize: A Min-Max path approach for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent setup times by Youssef Lahrichi, Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon, Sylvie Norre

- 4th Prize: Optimal maintenance policy for equipment leased with warranty by Amel Ben Mabrouk and Anis Chelbi

Outstanding Papers

MOSIM Agadir 2020 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation

(Without order)

- Retour d'expériences en ingénierie des parcours de patients en situation complexe by Hervé Pingaud, Elyes Lamine
- Partage de gains en mutualisation logistique : état de l'art et perspectives de recherche by Nassim Mrabti, Nadia Hamani, Ridha Derrouiche, Dorsaf Khammassi, Laurent Delahoche

Sommaire

Ports and spatial planning : an exploratory study in the moroccan context 1

Sharing a ride time constraint in a multi-trip dial-a-ride problem. An application to the non-urgent patient transportation problem 9

Retour d'expériences en ingénierie des parcours de patients en situation complexe 17

Etude des critères d'optimisation pour la replanification de chaines d'assemblage aéronautiques 25

Stakeholders' analysis in LNG bunkering : an integral part of risk management process 35

Proposed overall performance indicators for sustainable manufacturing management in mining industry 42

Recursive hybrid control architecture to deal with reactivity in the context of industry 4.0 47

Towards a predictive maintenance based on ultrasonic guided waves non-destructive testing technique : a case study 54

Adopting a model-based approach for satellite operations' diagnosis 63

A conceptual framework for asset management 4.0 70

Simulation d'une chaîne de valeur circulaire dans le balayage de rue printanier : étude préliminaire 76

Modeling patient flow in the emergency department using machine learning and simulation 85

Investigating the use of a model-based approach to assess automotive embedded software safety 91

Gestion de l'énergie et de la demande de pointe en puissance dans l'industrie : revue de littérature 100

Toward application of real-time video streams in production planning and control : a conceptual framework 110

Maritime risks taxonomy : A structured literature review of maritime risks classification 119

Resources scheduling in the emergency department using simulation in disaster conditions : case of COVID-19 136

Comprative study of two classical optimization algorithms solving economic dispatch problem 143

Complexité de la chaine logistique hospitalière et du COVID-19 : vers une modélisation multi-agents 149

Système à base de connaissances pour aider l'ingénierie des risques en réponse à appel d'offres 156

Diagnostic et pronostic de la maintenance basée sur la dégradation : cas d'un système vibratoire 164

Stratégie de maintenance optimale d'une station de panneaux solaires sur un horizon de temps fini 170

Risk and decision analysis for Reconfigurable Assembly System Design under uncertainties 177

Holistic management of risks for road tunnels 183

Revue des méthodes d'évaluation des contraintes ergonomiques des opérations de production et de leur intégration dans un système de production cyber-physique 189

Un système socio-cyber physique basé sur un réseau infocentré pour la collecte mobile de sang 198

A collaborative supply chain network design within a territory hospital group 205

Robotique collaborative en milieu industriel, apports de l'ergonomie dans la transformation du travail : étude en industrie sidérurgique 212

On the continuity of the swarm robot design using MBSE method and simulation 219

Contribution to sales forecasting based on recurrent neural network in the context of a moroccan company 229

Evaluation environnementale couplée à l'analyse multidimentionnelle des données pour l'économie circulaire 237

Value stream mapping 4.0 : a structural modeling approach 244

Spare parts inventory control based additive manufacturing 252

AI in Supply chain performance and resilience : a literature review 261

Supply Chain Planning in the Petroleum Industry : The Libyan Petroleum Sector Case Study 268

Economic assessment of ramp-up strategies in multi-variant production 276

Predictions de RUL par analyse de similarités 283

Assessing the reduction of empty backhauls using transshipment points 291

Understanding the determinants of blockchain technology adoption stages and supply chain performance using the technology-organization-environment framework 298

Optimal design of a leased vehicle fleet with consideration of maintenance and environmental constraints 307

Framework of performance measurement and management for industry 4.0 ERA 314

Performance evaluation of centralized maintenance workshop in the circular economy context 320

Collaboration horizontale durable des réseaux de transport de marchandises : état de l'art et perspectives 326

Modélisation du programme directeur de production en vue de la transition numérique des PME manufacturières 337

Utilisation des approches de l'industrie 4.0 et d l'internet physique pour le déploiement d'entrepôts urbains 345

Study of the impact of quay crane productivity rate on berth and quay crane assignment and scheduling 353

Case study of supply chain in textile industry : a dynamic product allocation decision problem 358

Demand driven MRP : literature review and research issues 364

A multi-objective Approach for the Combined Master Surgical Schedule and Surgical Case Assignment Problems 374

A three-stage Approach for the Multi-period Green Home Health Care Problem with Varying Speed Constraints 380

Fouille de données et segmentation de chroniques par extrema : considérations préliminaires 388

Big Data for Supply Chain Management in Industry 4.0 Context : A comprehensive Survey 399

Modélisation et optimisation du problème de planification de type RMRP 409

Multi-period Multi-item Lot sizing under Random Yield ans Stochastic Capacity 415

Predictive maintenance based on decentralized CPS and Convolution's Neural Network 421

A mixed integer linear program for human and material resources optimization in emergency department 427

Service policy optimization for urban public transport networks : mobility constraints during health emergency of pandemic cycles 433

Modélisation du problème de l'allocation des planches et des postes à quai dans les ports vraquiers 440

Dimensionnement d'espaces de travail intégrant les surfaces d'usage des équipements 448

De la simulation à évènement discret au machine learning pour la chaine logistique 455

A finance driven supply chain network design model 462

Optimisation conjointe de la planification de la production d'énergie de la maintenance et des pièces de rechange d'un parc éolien 471

Portrait conceptuel de la gestion de l'énergie dans les systèmes de production 477

Smart Ports Design Features Analysis : A Systematic Literature Review 483

CO^2 emission's study of the hydrocarbon supply chain aiming for resources pooling strategy 492

A framework for developing a performance measurement system in healthcare : a case study in Montreal 498

Usage des pénalités dans les modèles économiques de management industriel 508

Optimal integration of product configuration and porcess planning to meet individual customer requirements in mass customization 515

Développement d'un outil de suivi des mouvements des grains de blé biologique au niveau de la chaine d'approvisionnement 522

Simulation model for the decontamination of surgical instruments and analysis of automation scenarios 529

Modélisation de contrôleurs discrets pour l'industrie 4.0 535

Conception d'un SIAD pour la planification minière : mise en œuvre dans le contexte minier de l'extraction du phosphate 542

Multi-objective process and production planning integration in reconfigurable manufacturing environment : augmented e-constraint based approach 552

Modularity of RMS : what about the aggregation ? 558

Programmation linéaire en nombres entiers pour l'ordonnancement de projet multi-compétence avec préemption partielle 564

Simulation d'une salle de tissage : impact du nombre de tisserands sur les temps d'arrêt des machines et sur les retards de production 571

Analyse topologique des structures de données : application à la migration des systèmes d'information d'entreprise 585

Jumeau numérique : approches pour le maintien d'un inventaire géolocalisé en temps réel d'une cour à bois 592

Optimal maintenance policy for equipment leased with warranty 601

Avantages potentiels du reverse blending sur la chaine logistique de l'industrie des engrais 608

Stratégie intégrée de production, maintenance et de carte de contrôle d'une chaine logistique sous contrainte de qualité 615

Déploiement des véhicules de secours et d'assistance aux victimes en tenant compte de l'optimisme du décideur 621

Industrie du futur : aide à l'identification des phénomènes dangereux lors de la conception de machines flexibles 628

End of life management of complex products in an industry 4.0 driven and costumer-centric paradigm : a research agenda 634

Modélisation et simulation d'un module d'ajustement de la capacité d'un système DDMRP 640

A min-max path approach for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent setup times 648

L'intégration des facteurs humains dès la première phase de conception : application sur la pénibilité 658

Domicile du futur 4.0 pour personnes atteintes de début de troubles neurodégénératifs majeurs, TNM 664

Un modèle de blending pour la planification dynamique d'une chaine logistique minière 670

L'étude de l'impact des innovations technologiques digitales sur la performance durable d'une chaîne logistique : cas du secteur halio-industriel 680

Mixed integer linear programming formulation for a multi-echelon integrated supply chain within mass customization strategy 687

Time-indexed formulations for the order acceptance scheduling problem under energy aspects 699

A new bi-objective optimization model for bus priority network design 705

Prise en compte de la santé-sécurité dans la conception et l'exploitation des systèmes reconfigurables 711

Vers un cadre méthodologique de conception des systèmes humains-robots 718

Exploration de données de planification pour la modélisation des incertitudes dues à l'horizon glissant 725

Function analysis of manufacturing execution systems (MES) in cyber physical production systems (CPPS) 731

Study of symbiotic flows with economic approach 738

Partage de gains en mutualisation logistique : état de l'art et perspectives de recherche 747

Linking 4.0 Technologies and performance indicators based on a reference Model for supply chain 756

Improvement of sales prediction by fitted-to-product time-series models 762

FVMEARA : a new system approach for security and safety risk co-assesment based on ICVSS methodology 772

The complexity of the territorial logistics ecosystem 781

Supply chain routing scheduling sub-model design : case of export bulk ports 787

Evaluation de l'incertitude pour l'aide à la replanification en horizon glissant d'une chaîne logistique 793

Participants

Participants 802

PORTS AND SPATIAL PLANNING: AN EXPLORATORY STUDY IN THE MOROCCAN CONTEXT

Ouafae ZEROUALI OUARITI

ENCG AGADIR, Université Ibn Zohr Quartier Salam
Agadir, Morocco
O.zerouali@uiz.ac.ma

El Mehdi JEBRANE

ENCG AGADIR, Université Ibn Zohr Quartier Salam
Agadir, Morocco
mehdijebrane@gmail.com

ABSTRACT: *The evolution of the relationship between the city and the port has always been a topical subject, inspiring various speakers considering the plethora of fields of interaction offered by this discipline. Several authors in different disciples have proposed studies emphasizing this relationship, in terms of change of urban landscape, morphology of ports and spatial dissociation between port function and urban space. Following this logic comes our communication article where, through an exploratory quality study we have proposed a conceptual model mobilizing two key concepts from the literature, "maritime transport" and "spatial planning" in order to detect the logic behind the port-city relationship. To this end, most of the 22 respondents belonging to port stakeholders approved during the semi-structured interviews the existence of this relationship in the Moroccan context.*

KEYWORDS: *Maritime systems, Urban systems, Transportation systems, Port-city, Spatial planning.*

1 INTRODUCTION

The globalization of trade has largely contributed to increase the role of cities, by developing a phenomenon called "metropolization" so much so that globalization rhymes with metropolization (Veltz, 1996). Globalization is undeniably reflected in the connection between the different points of the planet and their interdependence (Dollfus, 1997). Since they are places of decision-making, metropolises are the privileged places where this connection is made through several types of flows (Frémont, 2019). For instance, we mention information and financial exchanges and the mobility of travelers for tourism or business between cities as inhibitors behind the development of cities (Sassen, 2000).

Less studied, interactions are also strongly significant between international flows of goods and metropolitan areas (Hesse, 2008). Important centers of consumption and production but also ensuring a role of redistribution of these goods towards their hinterland (Hall et al., 2012), metropolises are places of polarization on a world scale of these international flows (Ducruet and Jo, 2007). In the service of these latter, maritime transport, as well as air transport, are themselves industries whose development is already well advanced. Indeed, at the interface between metropolization, international trade flows, and international transport is the gateway to metropolitan areas (Slack et al., 1996). They are notably made up of seaports and airports which form, inside the metropolitan area, vast industrial and logistics areas in which tens of thousands of people work. On a world scale, it is through these gateways that the metropolises are brought into contact with one another for the flow of goods in an extended hinterland. In other words, these gateways are the main nodes and means of import, export and distribution of goods flows in the hinterlands of metropolitan areas (Fageda, 2000). However, this requires a specific organization of the gateway in close independence from that of international transport, which shape the morphology of metropolitan areas, its urban landscape and its relationship with its hinterland (Dablanc, 2017).

Consequently, this is the logic behind the development of our article, where we are trying to distinguish the port-city relationship, a factor of increasing importance in the organization of the supply chains of shippers and logistics service providers. In order to accomplish this, we relied on the concept of the maritime gateways precisely the container ports and their impact on the metropolization of hinterlands through the apprehension of spatial planning. Thus, we first mobilized a multidisciplinary literature in order to identify the hypothetical relationships that link them and lead to a theoretical model. Subsequently, this model has been contextualized qualitatively through an exploratory study with a sample of stakeholders and specialists in the maritime and spatial domain targeted by our problematic, taking into account the specificities of the Moroccan national context.

The remainder of this paper is introduced in four sections. The following section presents a theorical background related to maritime transport and port-city concepts. Next, comes the methodology used for the exploratory study in section 3. Then finally, comes the discussion of the results and the conclusion in section 4.

2 THEORICAL BACKGROUND

2.1 Ports and maritime transport

More than 80% of world economic merchandise trade takes place by sea (Rezaei et al., 2019). Seaports play a key role in the global economy (Frémont, 2012). They represent the contact points between the global circulation of goods and the continental consumer markets. This function was formalized by Vigarié (1979) under the title of the port triptych associating the foreland, determined by all the calls of the ships serving the port, and the hinterland or hinterland which corresponds the location of the main continental customers of the port.

In addition, technological advances have significantly increased the efficiency of this mode of transport. For example, containerization of goods has played an important role in the development of international intermodal (Frémont, 2005) transportation networks. Indeed, with the arrival of the container, a large international transport network based on the use of a standard cargo format has developed; over 60% of general cargo transported by ship is now containerized, with some routes between industrialized countries reaching a rate of 100% (Steenken et al. 2004). This standardization has accelerated the transfer of goods from one mode of transport to another, even if the first regular service only dates back to 1961 (Steenken et al. 2004). Even today, transfer operations from one mode of transport to another remain the key element of an efficient transport system subject to continuous development and research.

The development of these networks has had a huge impact on international transport. Indeed, the ports which have been chosen as transfer points (hubs) by the major shipping lines have faced considerable and rapid increases in the volume of containers handled (Insight, 2005). In addition, the search for economies of scale has led to a high concentration of international traffic. This explains why ports are often identified as the bottleneck in international intermodal transport networks. In order to remain competitive, container port terminals must therefore rely on the efficiency and attractiveness of transshipment operations which result in the measurement and achievement of performance. The latter is considered a well-established segment in the academic literature on ports in terms of number of publications (Pallis et al., 2011; Woo et al., 2011).

2.2 Port-city concept

The evolution of maritime transport over time has therefore changed the organization of all of the logistics chains spanning the land side (hinterland) which juxtaposes the ports (Jebrane and Ouariti, 2020). Indeed, located on the front line, the port cities have accompanied these changes, whether in their economic and social fabric, in the distribution of the spatial holdings of the various urban and port functions or even in their mode of governance (Lévêque, 2014 ; Xiao and Lam, 2017). The analysis of port-city relations has a double objective (Ducruet, 2008). On the one hand, it aims to understand and assess the interdependence between the host city and its port, and to characterize the morphological and functional links between the two, especially at the interface (Dablanc and Frémont, 2015). On the other hand, it seeks to assess and improve competitiveness, inter-city and inter-port, but also of the port-city couple. In particular, the question of knowing if the port considered as a gateway is an engine of economic development for the city is an old problem and constantly renewed according to the changes of paradigms (Ducruet and Lee, 2006). To better understand this relationship, it is important to quote the main studies that have dealt with the concept of port-city (table 1) :

Model	Definition
Anyport model (Bird, 1963)	This model analyses port developments over time, up to the containerization revolution witnessed by the author. We can observe the gradual departure from port functions of the urban territory and its relocation to the periphery, on large land holdings better suited to the large infrastructures necessary for containerization.
Port-city model (Hoyle, 1997)	The concept of Port-city was born from the idea of the close association between the city and the port which has prevailed for so long, and which is akin to a symbiosis. The dimensions are multiple: spatial and economic in the first place, but also social and political, for joint planning and management.
Interface model (Hayuth, 1982)	The degree of spatial association between the city and the port was studied by Hayuth (1982), who introduced the concept of interface. According to this author, this materializes two major components of the Port-city's contact zone and interactions: on the one hand, a spatial and economic system, derived from the use of the land in contact between the city and the port, which corresponds to the morphological and functional analysis of the interface. On the other hand, an ecological system, centred on the quality of air, water and the landscape, as well as on the quality of life at the interface.
Port-city competition (Norcliffe et al., 1996)	The notion of interface (Hayuth 1982) has been used to analyze the spatial competition between the city and the port. This manifests itself in the competition between economic activities at the interface. They analyze economic activities, port and non-port and determine two preponderant criteria of location: the quantity of labor and that of available land necessary.
Updated Port-city Model(Hoyle, 1989)	By synthesizing the spatial analysis of Bird (1963) and the interface of Hayuth (1982). The author conceptualizes the port-city model that is currently the most followed, at the local level, both in port studies and in urban studies. It updates the Anyport model (Bird 1963) according to the most recent maritime technological evolutions, which push the ports in urban periphery. He integrated the functional and environmental interface of Hayuth (1982) into it.

Table 1: Evolution of port-city concept

2.3 Impact of port on cities

The literature agrees that the positive local impacts of port activity are essentially linked to the economic bene-

fits for the city and its inhabitants (Jugie, 2018). Merk Olaf, in the OECD synthesis report (2013), identifies four major roles of the port as the city's economic engine. First, the port is a trade facilitator, which can be thought of locally as regionally. As the main continental gateway, the port brings in and out most of the goods needed by the city. The port's competitiveness influences the volume of trade (Merk, 2013). Its gateway role is in competition with certain products by airports, but remains preponderant in very many cases. The local impact therefore remains despite the migration of logistics activities outside the city and the increase in transshipment activities at the port (Jugie, 2017). The port remains a key lever for international exports.

Second, the port's ability to attract high value-added goods greatly determines the importance of its role as an economic catalyst. The volume but also the nature of the freight are major factors; container traffic therefore generates more added value than bulk goods and the diversification of port activities attracts more than specialization. But unlike airports, (Jugie, 2018) considers that the ports attract little added business value, which, these days, limits their function of economic engine of the city. However, ports allow the retention and attraction of businesses in a major way and play an important role in the promotion of intermodal transport. Port performance also depends on its ability to agglomerate the development of goods in the urban space (Robinson, 2002). Thus, the presence of a port cluster in the city makes it possible to retain added value at the local level (De Langen, 2002). However, the multiplier effect of internal links, or cluster synergy effect, varies greatly from one port to another, depending on the local economic structure, as well as on governance (Notteboom and Rodrigue, 2007).

Third, the port is a major provider of jobs for the city, as a consequence of added value. However, if it is accepted that one million tons of freight leaving the port generates on average 800 direct and indirect jobs, the disparities between the ports are large (Merk, 2013). The nature of the freight and the economic profile of the city are two important criteria. The more the city is tertiary, the greater the added value and the numerous direct local jobs, but indirect, connected and catalyzed jobs are however often distant and difficult to assess (Merk, 2013). However, the definition of port jobs or jobs related to the port sector is increasingly difficult to define, and differs from one study to another (Merk, 2013); it is therefore difficult to qualify the evolution of the port's impact in terms of jobs. In addition, as more and more port activities leave the urban space, the role of providing local jobs is diminishing (Grossmann, 2008) in favor of regional and global jobs, especially those related to bulk. It seems undeniable that the port identity is largely fading (Oakley, 2011), but the real economic impact, particularly in terms of jobs and added value, remains largely to be reassessed. Jugie (2018) sees this as an important line of research, both for port studies and for urban studies.

Finally, the port is a provider of innovation for the city. Indeed, the port is by nature an agglomeration of activities which themselves attract research and development activities (Merk, 2013). The port therefore accumulates innovation opportunities on its territory and nearby, which is sought after for synergistic effects. It is therefore the city, much more than the regional or global territory, which benefits (Frémont and Ducret, 2005). This axis is still little studied in the literature. This role remains efficient at the local level, as well as, to a large extent, that of exchange facilitator. But the roles of provider of jobs and added value are increasingly escaping the urban framework. All of these elements impacted by ports (jobs, town planning, environment, etc.) can be understood by the concept of territorial development (Torre, 2015).

It is therefore clear that the literature has dealt significantly with the issue relating to the port-city relationship (table 2). In short, this phenomenon is explained by the major roles of the port as an economic engine of the city (Hamri et al., 2014). In other words, a port plays an important role in the transfer of economic wealth to cities. The port is thus considered both as the gateway to metropolitan areas and the main interface for the movement of goods flows. Logically the influence of ports on cities and their development mentioned above is therefore relative to the degrees of port performance. Hence the apprehension of the hypothesis below:

H1: Port performance influences positively spatial planning.

Authors	Country Case Studies
Ilchenko et Glushko, 2017	Ukraine
Volkov, 2018	Russia
Metaxas, 2010	Spain
Daniele et Marani, 2011	Italy
Pallis, 2012	Nigeria
Galibaka et Kangoye, 2014	Sengal
Malyadi, 2010	Morocco
Cho et Ha, 2009	China

Table 2: Summary of empirical studies involving Port-city

3 METHODOLOGY

3.1 Objectives of the exploratory study

In order to consolidate and enrich the theorical model described above, an exploratory study is being carried out. The literature highlights the importance of the mutual relationship between stakeholders in the port environment in order to better understand the city/port relationship. However, it has been studied very little empirically. This is the reason why it is necessary to approach the theory framing this axis namely the main seaport stakeholders groups as shown in figure 1 (Notteboom and Winkelmans, 2002). Stakeholder theory refers to anyone whose usefulness is affected by the decisions of the organization. The interveners refer to a

group or individual who can affect or be affected by the achievement of the organization's objectives (Freeman and Reed, 1983).

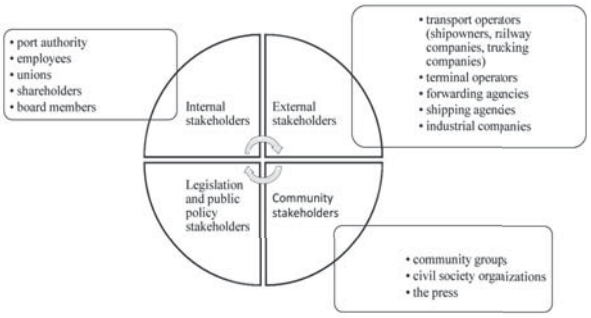


Figure 1: The main seaport stakeholders groups.

3.2 Methodological Choices - Data Collection

This exploratory study aims to collect the perceptions of port stakeholders on port performance and its impact on the city. As part of this research, direct semi-structured interviews and focus groups were the most appropriate (Bengtsson, 2016). This approach made it possible to confirm certain relationships between different variables already tested empirically in the literature, but also to find new research perspectives in the Moroccan context.
An interview guide, made up of two themes (Port performance and spatial planning) was produced based on the research objectives, making it possible to follow a common pattern for all the interviews. We therefore asked our participants (table 3) to describe according to their own opinions how they perceive port performance and how to it affect the spatial planning around them..

3.3 Description Of The Study Area

Our field of study included a set of port stakeholders distributed mainly between Tangier, Casablanca and Agadir. The choice of these ports is largely due to their importance in the national container traffic (including transshipment), distributed successively between 43%, 20% and 3% according to the National Ports Agency (ANP). We have also included other stakeholders who participate indirectly in port governance mainly located in Rabat to better detect the complexity that lies in identifying the determinants of port performance.

3.4 Conduct of interviews

It took us three months to collect data, contact the participants, set dates and conduct the interviews, starting from November 2019 to Mars 2020. While most of the interviews were made through Skype conferences or telephone conversations, few of the interviews were face-to-face meetings at the participants location some of them were recorded depending on the willingness of the respondents, others were transcribed. Therefore, in order to have a full representativeness of the four types of stakeholders (Notteboom and Winkelmans, 2002). A total of 22 interviews out of 48 planned at first from different entities were enough for our study (table 3). Following the data saturation assumption (Suddaby, 2006) which confirms the credibility and transferability of research.

The interviews lasted between 20 minutes and 40 minutes, it should be noted that the interviews were not preceded by exposure to a stimulus. Therefore, to answer the questions in the interview guide, the respondents were based on their past experiences in relation to the ports and how they perceive the spatial planning in port cities depending on the role they play such as activities related to logistics, industrial exportation/importation, governance, design or port security. These interviews are thus based on a retrospective questioning, with the aim of interviewing the sample on a set of navigations that do not include a concept in particular.

Participant	Function	City
National Ports Agency	Establishment of the authority and regulation of the new Moroccan port system.	Agadir
Marsa Maroc	Operation of Moroccan terminals and docks.	Agadir
Moroccan Association of Producers & Exporters of Fruits and Vegetables	Association which represents its members and defends their interests with their partners: administrations, banks and any national or international organization.	Agadir
The General Confederation of Enterprises in Morocco	Private association bringing together entrepreneurs from Morocco that represents the private sector to public authorities and institutions.	Agadir
SOMAPORT	Port operator in Casablanca port Terminals.	Casablanca
SOSIPO	Promote the activity of port grain elevators and other services in terms of grain transit.	Casablanca
RENAULT-SOMACA	French multinational automobile manufacturer.	Casablanca
Maroc Citrus	Moroccan interprofessional citrus federation brings together 5 professional organizations representing all the links in the citrus sector.	Casablanca
OCP Group	Leading Moroccan exporter of phosphate rock, phosphoric acid and phosphate fertilizers in the world.	Casablanca
Administration of Customs and Indirect Taxes	Charged of the collection of customs and duties taxes, of excise taxes and quasi-taxes, the fight against the illicit traffics.	Casablanca
DHL	World leader in transport and logistics.	Casablanca
Kuehne + Nagel	Global transport and logistics company.	Casablanca
Association of Customs Freight Forwarders in Morocco	Supervise its members (forwarders) as a force for proposals and a privileged channel for the promotion of customs regulations.	Casablanca
Directorate of Ports and Public Maritime Domain	Development of the infrastructure and Ministry's policy in the port sector.	Rabat
Moroccan Agency for Logistics Development	Coordinate nation-wide actions geared towards the amelioration of logistics competitiveness around specific projects such as logistics parks.	Rabat
Moroccan Agency for Nuclear & Radiological Safety & Security	Public establishment of a strategic nature responsible for the regulation, security and control of activities involving sources of radiation.	Rabat
National transport and logistics company	Moroccan public company responsible for ensuring brokerage services in the field of national and international freight transport.	Rabat
National Agency for Aquaculture Development	Moroccan public institution involved in Marine aquaculture development throughout national coastline.	Rabat
Tangier Med Special Agency	Planning, development and management of the Tangier Med I and II port complex.	Tangier
EUROGATE	Tangier container terminal Operator.	Tangier
APM Terminals	Tangier container terminal Operator.	Tangier
YAZAKI	Japanese automotive supplier specializing in cable systems, electrical systems, instrumentation.	Tangier

Table 3: Presentation of the selected participants

The search for information is therefore mainly oriented on the presentation of the concept of port performance and spatial planning depending on their perception, their

apprehension, their influence from the participants perspective and what are the means according to them that can bind port and city together. During the interviews, the recommended rules for conducting a semi-structured interview were followed. Thus the interviewer developed: a positive attitude by listening with interest and attention to all the words of the interviewee and an empathetic attitude aiming to be as close as possible to the frame of reference of the interviewee.

3.5 Thematic Content Analysis

The method used to analyze the semi-structured individual interviews is the analysis of inductive thematic content using the Nvivo 12 software. Although this software has been used, the content analysis methodology is substantially identical to the analysis manual content. Thus, the recommendations of Bardin (2003) along with Miles and Huberman (1994) were applied, in particular the use of classification by themes and sub-themes of hierarchical type.

Therefore, we transcribed the recorded interviews, then we grouped the texts cut into well-defined verbatims according to their themes. Following this, we counted the frequency and occurrence of their appearance during interviews. We thus obtained the following decreasing order grid from the most quoted verbatims by our participants to the least, according to their theme (table 4).

Themes	Verbatims
Port performance	1. Performance indicators
	2. Port management & governance
	3. Port costs
	4. Port service quality
	5. Competitiveness
	6. Supply chain integration
	7. Port infrastructure
	8. Hinterland connection
	9. Port geographical location
	10. Maritime connectivity
	11. Port security
	12. Human resources
	13. Financial strength
	14. Operational efficiency
	15. Sustainability
Territorial planning	1. Flow of goods
	2. Specialized economic infrastructures
	3. Specialized social infrastructures
	4. Logistics facilities
	5. Road transport
	6. Territory governance
	7. Development
	8. Governance
	9. Attractiveness
Port-city	1. Anchoring
	2. Specialization
	3. Tangier City
	4. Gateway
	5. Ecosystems

Table 4: Analysis grid of identified verbatims

4 DISCUSSION AND CONCLUSION

The results of the interviews show that not only most of the participants agree on the fact that there's several indicators that influence the port's performance, particularly port management and governance. But also that port and the city are indeed bonded so much so that the latter's development is directly impacted by the degree of port performance and competitiveness (Frémont, 2010 ; Masson et Petiot, 2013 ; Dablanc et Frémont, 2015). They also consider that port are indeed the main gate to access a port city and its hinterland (Slack, 1996). However they consider that this impact is directly inhibited by the flow of goods (Raimbault et al., 2014). Indeed, they unanimously agreed that the movement of goods in the city (mainly through road transport) helps it's development. Furthermore, they believe that it plays a major role in the functioning of these spaces, and therefore in the possibility of defining them. Especially through logistics facilities which are increasing in peri-urban areas and therefore becoming a factor of economic development used by the local collectives (Savy, 2006 ; Dorner et Fender, 2007).

This founding also goes hand in hand with the need of anchoring the flow of goods and the associated activities depending on their type (Automotive industry, food industry, aeronautical industry, mining industry) in the territory they transit by (Zimmermann, 1998). Indeed, several of the external stockholder insisted on the specialization of regions according to the type of flow in order to create a phenomenon of harmony and symbiosis (Donsimoni, 2015).

In other words, the participants focus on the need to develop the territories in terms of training and employment, transport and logistics infrastructure, as well as other infrastructure related to health and social services in order to accommodate the needs generated by the movement of goods within the city depending on their type (Pecqueur and Zimmermann, 2004). The example of the city of Tangier has been used several times to demonstrate the impact of anchoring the flows related to the automotive industry on the development of the Tanger-Tetouane-Al Hoceïma region, especially during the last 10 years. Therefore facilitating the creation of an automotive industry ecosystem.

To summarize the outputs in a simple way, at the level of a port city the more a "gateway port" is efficient, the higher the volume and the value of the flows of goods passing through it, and the more the degree of development of this port city is important. This level of planning is however accentuated by the concept of the territorial anchoring of activities associated with flows (Zimmermann, 1998). Consequently, following this exploratory study, we have decided to redo our research hypothesis in order to propose three new ones shown schematically in figure 2.

H1: Port performance influences positively flows of goods.
H2: Flows of goods influences positively spatial planning.

H2.1: Territorial anchoring positively moderates the influence of flows of goof on territorial planning.

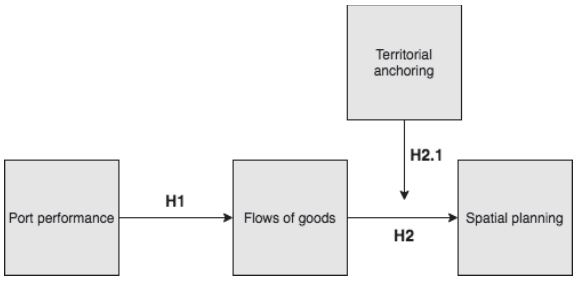


Figure 2: Presentation of the conceptual model

REFERENCES

Bardin, L., 2003. L'analyse de contenu et de la forme des communications. *Les méthodes des sciences humaines*, 1, 243-269.

Bengtsson, M., 2016. How to plan and perform a qualitative study using content analysis. *NursingPlus Open*, 2, 8-14.

Bird J., 1983. Gateways: slow recognition, but irresistible rise, *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 74(3), 196-202.

Bird, J., 1963. *The Major Seaports of the United Kingdom*. London: Hutchinson.

Dablanc, L., 2017. Logistique et transport de marchandises dans les grandes métropoles. *L'économie politique*, 76(4), 50-60.

Dablanc, L., and A. Fremont, 2015. *La métropole logistique.* Armand Colin.

De Langen, P. W., 2002. Clustering and performance: the case of maritime clustering in The Netherlands. *Maritime Policy and Management*, vol. 29 (3), 209-221.

Dorner, P.P., & Fender, M., (2007). La logistique globale et le supply chain management ?

Démare, T., 2016. *Une approche systémique à base d'agents et de graphes dynamiques pour modéliser l'interface logistique port-métropole*. Thèse de Doctorat, Université du Havre, France.

Dollfus, O., 1997. Les espaces de la mondialisation. Sciences humaines. *Hors série*, (17), 10-13.

Donsimoni, M. (2015). Symbioses Port-Ville pour un meilleur ancrage local des activités industrialo-portuaires: l'exemple de Safi au Maroc.

Ducruet C., and J.-C. Jo, 2007. Coastal cities, port activities and logistic constraints in a socialist developing country: the case of North Korea. *Transport Reviews*, 28(1), p.1-25.

Ducruet C., and S.W. Lee, 2006. Frontline soldiers of globalization: port-city evolution and regional competition, *Geojournal,* 67(2), p.107-122.

Ducruet, C., 2008. *Régions portuaires et mondialisation*. Méditerranée, (111), 15–24.

Fageda, X., 2000. Load Centers In the Mediterranean Port Range: Port Hubs and Port Gateways. *40th congress of the European Social Science Association*, Bacelona, Spain.

Freeman, R. E., and D. L. Reed, 1983. Stockholders and stakeholders: A new perspective on corporate governance. *California management review*, 25(3), 88-106.

Frémont A., and C. Ducruet, 2005. The emergence of a mega-port: Busan, from the global to the local. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*. 96(4), p.421-432.

Frémont, A., 2012. Quel rôle pour le fleuve dans le Grand Paris des marchandises ?. *L'espace géographique*, tome 41(3).

Frémont, A. (2010). Les ports, leviers de développement?. *Afrique contemporaine*, (2), 59-71.

Frémont, A., 2019. Le transport maritime depuis 1945 : facteur clé de la mondialisation. *Entreprises et histoire*, 94(1), 16-29.

Frémont, A., and M. Soppé, 2005. Transport maritime conteneurisé et mondialisation. *Annales de géographie*, 2, pp. 187-200.

Grossmann, I., 2008. Perspectives for Hamburg as a port city in the context of a changing global environment. *Geoforum*, 39 (6), 2062-2072.

Hamri, H. M., Ouariti, O. Z., & Sadiqui, A. (2014). Territory Attractiveness : Case of Souss-Massa-Draa Region. *International Journal of Research in Management*, 1(4), 5.

Hall, P. V., 2012. Connecting, disconnecting and reconnecting: port logistics and Vancouver's Fraser River. *L'espace géographique*, 41(3), 223-235.

Hayuth, Y., 1982. *The port-urban interface: an area in transition*. Area, 219-224.

Hesse, M., 2008. *The city as a terminal: The urban context of logistics and freight transport*. Ashgate Publishing, Ltd.

Hoyle, B. S., 1989. The port—City interface: Trends, problems and examples. *Geoforum*, 20(4), 429-435.

Hoyle, B. S., 1997. Ports, port cities and coastal zones: Development, interdependence and competition in East Africa. *Academie royale des sciences d'outre-mer*.

Insight, G., 2005. *Institute of Shipping Economics and Logistics*. Workgroup for Infrastructure Policy and Berlin University of Technology.

Jebrane, E. M., & Ouariti, O. Z. (2020). L'Efficience et la Productivité Comme Indicateurs de Mesure de la Performance Logistique Portuaire: *Revue De Littérature. Strategy Management Logistics*, 1(1).

Jugie, J. H., 2017. *Les relations ville-port: Croiser les littératures pour croiser les perspectives*. CIRRELT, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport. Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation.

Jugie, J. H., 2018. *Les relations ville-port selon une approche d'écologie territoriale: le cas de Montréal*.

Masson, S., & Petiot, R. (2013). Logistique et territoire: multiplicité des interactions et forces de régulation. Géographie, économie, société, 15(4), 385-412.

Merk, O., 2013. *The competitiveness of global port-cities: synthesis report*.

Miles, M. B., and A. M. Huberman, 1994. *Qualitative data analysis: An expanded source book*. sage.

Norcliffe, G., K. Bassett, and T. Hoare, 1996. The emergence of postmodernism on the urban waterfront: geographical perspectives on changing relationships. *Journal of Transport Geography*, 4(2), 123-134.

Notteboom, T., and W. Winkelmans, 2002. Stakeholders relations management in ports: dealing with the interplay of forces among stakeholders in a changing competitive environment. *IAME 2002, International Association of Maritime Economists Annual Conference 2002*. Panama City, Panama.

Notteboom, T., and J. P. Rodrigue, 2007. Re-assessing port-hinterland relationships in the context of global commodity chains. *Ports, Cities and Global Supply Chains*, 51-66.

Pallis, A. A., T. K., Vitsounis, P. W., De Langen, and T. E. Notteboom, 2011. Port economics, policy and management: Content classification and survey. *Transport Reviews*, 31(4), 445-471.

Pecqueur, B., & Zimmermann, J. B. (2004). *Les fondements d'une économie de proximités*. Economie de proximités, Paris, Editions Lavoisier, 13-41.

Raimbault, N., & Bahoken, F. (2014). Quelles places pour les activités logistiques dans la métropole parisienne?. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement*, (23-24), 53-74.

Rezaei, J., L., van Wulfften Palthe, L., Tavasszy, B., Wiegmans, and F. van der Laan, 2019. Port performance measurement in the context of port choice: an MCDA approach. *Management Decision*.

Robinson, R., 2002. Ports as elements in value-driven chain systems: the new paradigm. *Maritime Policy and Management*, 29(3), 241-255.

Sassen, S., 2000. The global city: strategic site/new frontier. *American studies*, 41(2/3), 79-95.

Savy, M. (2006). *Logistique et territoire*. Paris: La documentation française.

Slack, B., C., Comtois, and G. Sletmo, 1996. Shipping lines as agents of change in the port industry. *Maritime Policy and Management*, 23(3), 289-300.

Steenken, D., S. Voß, and R. Stahlbock, 2004. Container terminal operation and operations research-a classification and literature review. *OR spectrum*, 26(1), 3-49.

Suddaby, R., 2006. *From the editors: What grounded theory is not.*

Torre, A., 2015. Théorie du développement territorial. *Géographie, économie, société*, 17(3), 273-288.

Veltz, P., 1996. Mondialisation, villes et territoires. *L'économie d'archipel*.

Vigarié, A., 1979. *Ports de commerce et vie littorale*. Hachette.

Woo, S. H., S. Pettit, and A. K. Beresford, 2011. Port evolution and performance in changing logistics environments. *Maritime Economics and Logistics*, 13(3), 250-277.

Xiao, Z., & Lam, J. S. L. (2017). A systems framework for the sustainable development of a Port City: A case study of Singapore's policies. *Research in*

Transportation Business & Management, 22, 255-262.

Zimmermann, J. B., 1998. Nomadisme et ancrage territorial: propositions méthodologiques pour l'analyse des relations firmes-territoires. *Revue d'économie régionale et urbaine*, (2), 211-230.

Sharing a ride time constraint in a multi-trip dial-a-ride problem. An application to the non-urgent patient transportation problem

T. CHANE-HAÏ, S. VERCRAENE, T. MONTEIRO

Université de Lyon, INSA Lyon, Laboratoire DISP EA 4570, Lyon, France
timothee.chane-hai@insa-lyon.fr, samuel.vercraene@insa-lyon.fr, thibaud.monteiro@insa-lyon.fr

ABSTRACT: *This article presents a method to find close-to-Pareto-optimal solutions for a multi-objectives round-trip dial-a-ride problem (DARP) decomposed into two dependent sub-problems. In the studied problem, each user expresses two requests, a morning request and an evening request, that represent a round-trip itinerary on one day. The two objectives are the cost and excess ride time minimization. Instead of integrating all the requests into one single DARP, the requests are split between two smaller DARPs: one for the collection of morning requests and one for the collection of evening requests. However, the two DARPs cannot be solved independently because they share a constraint: the user maximal daily ride time. The developed heuristic aims to find a global close to optimal solution within reasonable computation time. The method is applied on real data from the NOMAd project which aims to improve the transportation of disable children from their home to medical centers in the city of Lyon.*

KEYWORDS: *Dial-a-ride problem, distributed decision, shared constraint, multi-trip, healthcare.*

1 INTRODUCTION

The non-emergency transportation of patients from their home to medical facilities is an important part of the healthcare system. It concerns disabled patients who are not able to go to medical facilities by themselves or who are not able to reach a sufficient assistance from a family member to do so. Many aspects are considered in this activity. The first aspect is the human aspect. Many of the patients use this service daily, and the trips can take more than an hour. Transportation takes a considerable amount of time in the daily life of the patients. So, it is important to make it as pleasant as reasonably possible. Good quality of service should be provided for the well-being of the patients. The second aspect is financial. In France, patients transportation cost 3.5 billion euros in 2010 and 5 million of persons were using this service (Tellez et al. 2020). The transportation cost is charged on the patients or on the healthcare system. This represents a considerable amount of money that can be reduced. Other aspects can be considered : the organisational aspect, the technical aspect, the environmental aspect, etc. But overall, the well-being and the financial aspect are the two most important. This transportation problem can be modelled as a dial-a-ride problem.

The dial-a-ride problem is itself a variant of the vehicle routing problem (VRP) which is a NP-hard problem, making computation time increase exponentially with the instance size. DARP and its variants have been extensively studied in the literature with cost reduction as the most studied objective (Cordeau and Laporte 2007; Gendreau et al. 2008; Braekers et al. 2016). In medical context, the well-being of the patients is essential. As a consequence, a second objective affiliated with this notion is often added. In our problem, we decided to use the unaccepted excess ride time as the service quality objective. The excess ride time corresponds to the ride time minus the minimal ride time. The unaccepted excess ride time corresponds to the ride time minus the maximal allowed ride time. All the requests are known in advance, so the problem is static and deterministic (Ho et al. 2018). Time windows constraints at pick-up and delivery points have been considered (Psaraftis 1983; Jaw et al. 1986; Toth and Vigo 1997). A fleet size and mix component has also been considered: the fleet is constituted of an unlimited number of heterogeneous capacitated vehicles (Golden et al. 1984; Ulusoy 1985). Vehicles are able to go to back to their depot more than once a day, adding a multi-trip component to the problem (Azi et al. 2007; Macedo et al. 2011; Hernandez et al. 2014). The multi-trip component has been previously studied in medical environment (Wong and Bell 2006; Lim et al. 2016) but no formulation took into account a maximal daily ride time constraint for the users. In previous studies, requests from a user were independent as the maximal ride time constraint were only associated with a single trip. In that case, it is possible to have an excessively long round-trip duration for a user despite respecting the individual maximal ride time constraint. This situation can potentially be avoided to improve the quality of service.

In this work, we tackle this issue by adding a maximal daily ride time constraint which binds together a set of requests made by a user. The term daily ride time refers to the set of requests and the term ride time refers to a single request. For each user, setting the maximal daily ride time to a value smaller than the sum of the maximal ride times is the key to reduce the inequalities. Each user calls for a

round-trip, which is a pair of pick-up and delivery needs, with a maximal daily ride time constraint. Consequently, it is no more possible to consider the morning request (from home to the medical facility) and the evening request (from the medical facility back home) of a user as independent requests. The goal is to improve the quality of service and reduce inequities among patients. All those considerations make our problem a fleet size and mix round-trip dial-a-ride problem with a round-trip constraint. In order to compute a feasible solution within reasonable computation time, we decomposed the problem into two smaller dependent sub-problems with a shared constraint. The first sub-problem is a DARP on the morning requests, the second sub-problem is a DARP on the evening requests. This decomposition has two main advantages. Firstly, the size of the problem is reduced by twofold. As the problem is NP-hard, it exponentially reduces the computation time. Secondly, it is possible to compute the sub-problems in parallel. Subdividing the problem or using parallel computation has been done in the past. Decomposing the problem into independent sub-problems is a common practice in the school bus routing problem which is a variant of the DARP (Ellegood et al. 2020). The first sub-problems could be a scheduling problem or/and an assignment problem and the last sub-problem is a routing problem. However, the sub-problems were independent as feasible sub-solutions were certain to lead to a feasible global solution. In another hand, cooperative parallel computing on the same problem (Crainic et al. 1997) has also shown great improvement in computation time. But again, the parallel computations towards a feasible solution were independent. In our problem, the sub-problems are dependent. As a consequence, the global solution made by the combination of the morning and evening results may not respect the maximal daily ride time constraint. In that case, we designed a heuristic that gradually modifies the problem's data and recomputes sub-solutions in order to reach a feasible daily solution. The method used to solve this problem is applied on real data from the NOMAd project. The NOMAd project aims to improve the transportation of disabled children from their home to medical facilities in the metropolis of Lyon.

The remainder of this article is structured as follows: section 2 presents the mathematical model while section 3 describe the heuristic used to solve the problem. The experiments are presented in section 4. Finally, the results are given in section 5.

2 PROBLEM SETTINGS AND MATHEMATICAL MODEL

2.1 Problem settings

As the problem is split into two sub-DARPs, the following is the mathematical model of a single sub-DARP.

A sub-DARP is modeled by a graph $G = (V, A)$. The set V of nodes contains the set of starting depots O^+, the set of arrival depots O^-, the set of pick-up nodes P and the set of delivery nodes D. Each node $i \in V$ has a service duration s_i and a time windows $[a_i, b_i]$. The service duration s_i is equal to 0 for any node in O^+ and in O^-. The arc between two nodes i and j represents the fastest and shortest path from i to j. Thus, each arc is associated with a duration t_{ij} and a distance Δ_{ij}. In reality, two nodes may have the same geographical position (e.g., starting depot and ending depot)

K is the set of vehicle types. Each vehicle has a starting depot $O_k^+ \in O^+$, an arrival depot $O_k^- \in O^-$, a maximal capacity Q^k, a fixed cost f_k, a duration cost α_k and a distance cost γ_k. The maximal shift length of a driver is T_k.

R is the set of requests. Each request $r \in R$ has a pick-up node $p_r \in P$, a delivery node $d_r \in D$, a maximal ride time T_r^+, a minimal ride time T_r^- and a quantity q_r of users to be transported. The minimal and maximal ride time settings are described in section 4.1. The load variation at a node is notated as ϕ, having $\phi_{p_r} = q_{p_r}$ at a pickup node and $\phi_{d_r} = q_{d_r}$ at a delivery node. At the starting depot and ending depot, the load variation is equal to 0 ($\phi_{O_k^+} = \phi_{O_k^-} = 0$) and there is no user inside a vehicle. This notation allows to translate the load variation from a request to a node.

D is the set of daily requests. Each daily request $d \in D$ is composed of the morning $r_m \in R$ and evening request $r_e \in R$ made by a user: $d_m = r_m, d_e = r_e$. A daily request has a maximal daily ride time T_d^+ and a minimal daily ride time T_d^-. The minimal daily ride time is the sum of the morning and evening minimal ride time ($T_d^- = T_{d_m}^- + T_{d_e}^-$). The maximal daily ride time setting is described in section 4.1.

2.2 Mathematical formulation

Variables

- $x_{i,j}^k$: is a binary variable which is equal to 1 if vehicle k uses arc (i,j) and 0 otherwise, $k \in K$, $(i, j) \in A$
- w_i^k: is a continuous variable representing the arrival time of vehicle k at node i, $k \in K$, $i \in V$
- l_i^k: is an integer variable representing the number of users in vehicle k after visiting node i, $k \in K$, $i \in V$
- ww_r: is a continuous variable representing the excess ride time of the request r, $r \in R$

Objectives

- The cost of a solution represents its transportation cost which the sum of all the fixed cost, the duration cost and the distance cost.

$$\begin{aligned}\min Cost = \min & \sum_{k\in K} f^k \sum_{i\in P} x^k_{o^+_k i} + \\ & + \sum_{k\in K} \alpha^k (w^k_{o^-_k} - w^k_{o^+_k}) \\ & + \sum_{k\in K} \sum_{(i,j)\in A} \gamma^k \Delta_{ij} x^k_{ij}\end{aligned} \quad (1)$$

- The excess ride time of a solution is the sum of the excess ride times of the users.

$$\min ExcessRideTime = \min \sum_{r\in R} ww_r \quad (2)$$

Constraints

The big-M values are defined in section 4.1.1.

- One and only one vehicle ensures pick-up and delivery for a request.

$$\sum_{(p_r,j)\in A} x^k_{p_r j} - \sum_{(j,d_r)\in A} x^k_{j d_r} = 0, \quad \forall r \in R, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k\in K} \sum_{(j,P_r)\in A} x^k_{j p_r} = 1, \quad \forall r \in R \quad (4)$$

- A vehicle leaves and returns to its depot no more than once.

$$\sum_{i\in V} x^k_{o^k_+ i} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i\in V} x^k_{i o^k_-} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

- No vehicle enters its starting depot or leaves its ending depot.

$$\sum_{i\in V} x^k_{i o^k_+} \leq 0, \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i\in V} x^k_{o^k_- i} \leq 0, \quad \forall k \in K \quad (8)$$

- The flow is conserved.

$$\sum_{(j,i)\in A} x^k_{ji} - \sum_{(i,j)\in A} x^k_{ij} = 0, \quad \forall i \in P \cup D, \forall k \in K \quad (9)$$

- Any vehicle which leaves its depot arrives at its arrival depot.

$$\sum_{i\in P} x^k_{o_k+i} - \sum_{i\in P} x^k_{i o^-_k} = 0, \quad \forall k \in K \quad (10)$$

- The arrival time at each node is greater than the time at the previous node plus the service time at the previous node and the transportation time between the two nodes.

$$w^k_j \geq w^k_i + t_{ij} + s_i - M_{11}(1 - x^k_{ij}), \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (11)$$

- The arrival time at any node is within its time window.

$$a_i - M_{12}(1 - \sum_{j\in V} x^k_{ij}) \leq w^k_i \leq b_i, \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (12)$$

- For any request, pick-up happens before delivery.

$$w^k_{p_r} + s_{p_r} + t_{p_r d_r} - M_{13}(1 - \sum_{j\in V} x^k_{ij}) \leq w^k_{d_r}, \quad \forall (i,j) \in A, \forall r \in R, \forall k \in K \quad (13)$$

- A vehicle leaves from its starting depot.

$$w^k_{o^+_k} + s_{o^+_k} + t_{o^+_k o^-_k} - M_{14}(1 - \sum_{j\in V} x^k_{o^+_k j}) \leq w^k_{o^-_k}, \quad \forall k \in K \quad (14)$$

- The load when leaving a node is equal to the previous load plus the load variation.

$$l^k_j \geq l^k_i + \phi_j - M_{15}(1 - x^k_{ij}), \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (15)$$

- The load cannot exceed the vehicle capacity.

$$l^k_i \leq \sum_{j\in V} Q^k x^k_{ij}, \quad \forall i \in V, \forall k \in k \quad (16)$$

- The transportation time of a user cannot exceed his/her maximal ride time.

$$w^k_{d_r} - w^k_{p_r} - s_{p_r} \leq T^+_r, \qquad \forall r \in R, \forall k \in K \quad (17)$$

- The shift length of a driver cannot exceed its maximal shift length.

$$w^k_{o^-_k} - w^k_{o^+_k} \leq T_k, \qquad \forall k \in K \quad (18)$$

- The excess ride time is the duration difference between solution path and the shortest path. This definition is used to clarify the second objective notation.

$$ww_r = \sum_{k \in K} (w^k_{d_r} - w^k_{p_r}) - T^-_r, \qquad \forall r \in R \quad (19)$$

- $x^k_{i,j}$ is a binary variable, w^k_i is a continuous variable, l^k_i is an integer variable, ww_r is a continuous variable,

$$x^k_{i,j} \in \{0,1\} \qquad w^k_i \in \mathbb{R}^+$$

$$l^k_i \in \mathbb{Z}^+ \qquad ww_r \in \mathbb{R}^+ \quad (20)$$

3 SOLUTION METHOD

3.1 Sub-DARP Pareto computation

A sub-DARP is solved as a mono-objective problem. For one sub-solution computation, only the cost or the unaccepted excess ride time objective is considered.

A large neighborhood search algorithm (LNS) from the previous work on the NOMAd project has been used to find sub-solutions (Tellez et al. 2018). As our problem is multi-objective, we needed an approach to consider the two objectives. It exists three main approaches: weighted objectives, lexicographic optimization and Pareto frontier optimization (Ho et al. 2018). The weighted approach is the simplest to implement. However, it requires to know beforehand the trade-offs between the different objectives in order to implement proper weights. The lexicographic approach is appropriate when one objective is by far more important than the second. The Pareto frontier is the correct approach when a global picture of the trade-off between the objectives is needed. However, the computational time is the longest because of a larger number of solution computations. In our case, we used the Pareto frontier optimization because the trade-offs between the cost and the unaccepted excess ride time are unknown.

To find the extreme points of the Pareto front, we used a lexicographic approach. For the first extreme point, cost is minimized then its value becomes the upper boundary for minimizing the unaccepted excess ride time. The objective $\vec{g}$ used to find this extreme point is defined in equation (21).

$$lex\ min\ \vec{g} = (Cost, UnacceptedExcessRideTime)\,. \quad (21)$$

The objective minimization order is swapped for the second extreme point.

The lexicographic method requires to add two boundary constraints for the maximal cost value and for the unaccepted excess ride time value, respectively $Cmax$(22), $Dmax$ (23).

- The cost is smaller than $Cmax$ and the unaccepted excess ride time is smaller than $Dmax$

$$\sum_{k \in K} f^k \sum_{i \in P} x^k_{o^+_k i} + \sum_{k \in K} \alpha^k (w^k_{o^-_k} - w^k_{o^+_k}) + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} \gamma^k \Delta_{ij} x^k_{ij} \leq Cmax \quad (22)$$

$$\sum_{r \in R} ww_r \leq Dmax \quad (23)$$

The other points of the Pareto front are found by relaxing the constraint related to the first objective. We used the augmented-epsilon constraint method (Mavrotas 2009).

3.2 Heuristic

The computation of a solution is done in a four steps loop: separate computation, combination, verification and modification. This loop is illustrated in the figure 1.

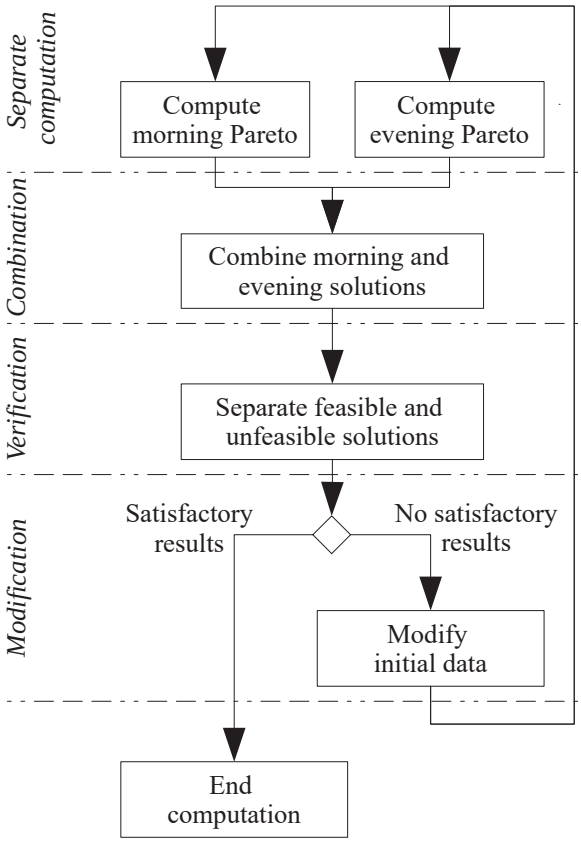


Figure 1 – Heuristic for daily solution

During the separate computation phase, the morning and evening Pareto fronts are computed using the LNS heuristic.

Then during the combination phase, all the combinations of the morning and evening sub-solutions are computed. C is the set of the solutions c from the combination of the sub-solutions. The daily cost of the solution is the sum of the costs of the morning sub-solution and the evening sub-solution. The same calculation is done for the daily unaccepted excess ride time. It is equal to the sum of the morning unaccepted excess ride time and the evening unaccepted excess ride time.

During the verification phase, the respect of the maximal daily ride time constraint is checked for every user in every solution. The maximal daily ride time constraint is formulated as in the formula (24). Every solution that does not respect this constraint is rejected. Within the set of feasible solutions, the dominated solutions are also ignored. The final set of solutions constitutes the Pareto front of the global daily feasible solution. However, it is possible that no combination constitutes a satisfactory solution (e.g., high daily cost). In that case, we proceed to the modification phase.

- Maximal daily ride time constraint

$$w^{k_m}_{d_{r_m}} - w^{k_m}_{p_{r_m}} - s_{p_{r_m}} + w^{k_e}_{d_{r_e}} - w^{k_e}_{p_{r_e}} - s_{p_{r_e}} \leq T^+_d$$

$$\forall d \in D, \forall k_m, k_e \in K \quad (24)$$

In essence, the modification phase aims to modify the initial data to find new solutions. In the process, one or some of the maximal ride time constraints are decreased. Different strategies have been tested is order to reach a global satisfactory Pareto. Those modification strategies are described in section 4.1.5 .

4 EXPERIMENTS

4.1 Data pre-processing

4.1.1 Setting the big-M

Several big-M are used in the model. In order to restrict the research space, they are set to a minimal value. When indexes are used, their values and domain of definition are set by the corresponding constraints.

$$\begin{array}{lcrcr} M_{11} & = & M_{ij} & = & b_i + t_{ij} + s_i \\ M_{12} & = & M_i & = & a_i \\ M_{13} & = & M_r & = & s_{p_r} + t_{p_r d_r} \\ M_{14} & = & M_{o^+_k o^-_k} & = & s_{o^+_k} + t_{o^+_k o^-_k} \\ M_{15} & = & & & \max\limits_{o \in P} \phi_o \end{array}$$

4.1.2 Setting the minimal ride time

The minimal ride time for a user is set by the formula (25). It corresponds to the greatest value between the shortest path and the time window opening duration minus the service time at the pick-up node. The figures 2 and 3 illustrates this concept. The time window opening duration is the difference between the upper bound of the pick-up node time window and the lower bound of the delivery node time window. Indeed, if the time window opening duration is greater than the shortest path, taking the shortest path does not respect the time window constraints (12).

$$T^-_r = \min[t_{p_r d_r}; a_{d_r} - b_{p_r} - s_{p_r}] \quad (25)$$

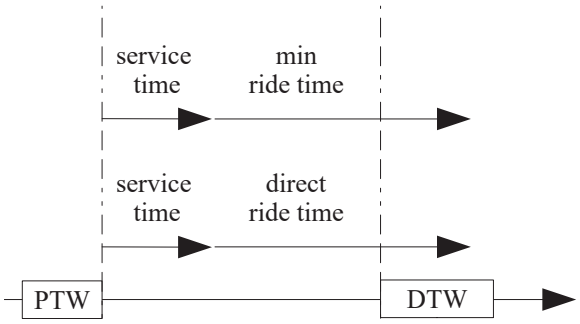


Figure 2 – Long min ride time setting

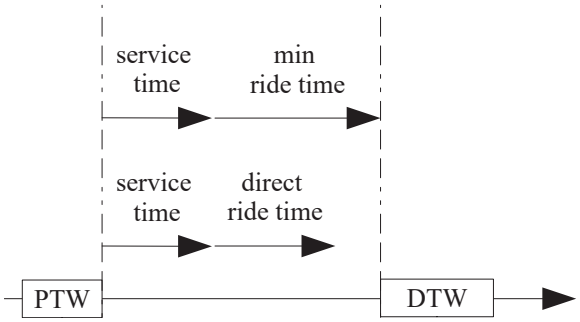


Figure 3 – Short min ride time setting

4.1.3 Setting the maximal ride time

The maximal ride time duration can be modified before the solution computation to avoid some of the feasible sub-solutions that lead to infeasible global solution. The maximal ride time is set by the formula (26). Initially, the maximal ride time is set to 150% of the minimal ride time value. If the initial maximal ride time is greater than the minimal ride time plus the maximal daily excess ride time, it can be reduced. Indeed, any ride time greater than this value in a sub-problem will not be a feasible solution for the global problem. This concept is illustrated by the figure 4.

$$T^+_r = \min[1.5 * T^-_r; T^-_r + T^+_d - T^-_d] \quad (26)$$

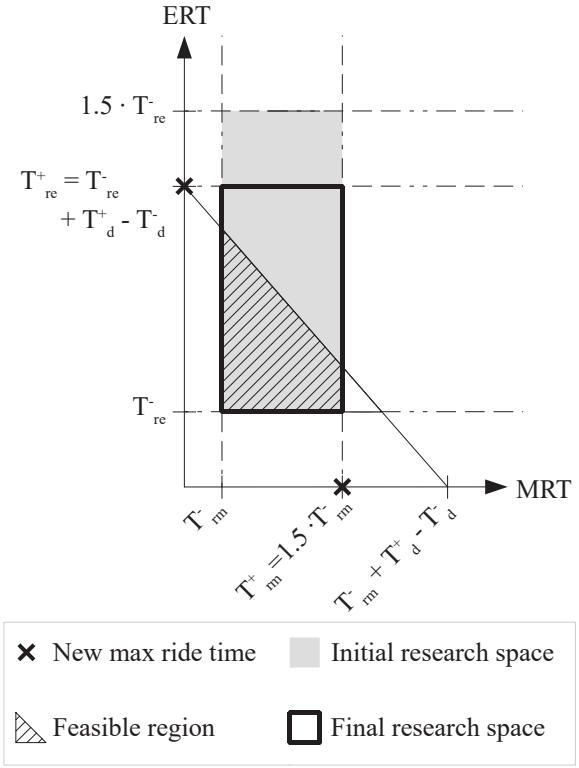


Figure 4 – Maximal ride time setting

4.1.4 Setting the maximal daily ride time (applied to NOMAd)

In the NOMAd project, the maximal daily ride time has been set to 150% of the daily minimal ride time. For example, a user shortest round-trip itinerary takes 2 hours, so his/her maximal daily ride time is equal to 3 hours.

But for users that are really close to their destination, this setting is not realistic and put too much constraint. Thus, a different setting is done for any user who resides less than 15 minutes away from his/her arrival. The maximal ride time value is changed to the minimal ride time plus 15 minutes. Thus, the maximal daily ride time value is equal to the minimal daily ride time value plus 30 minutes. For example, a user shortest itinerary takes 2 minutes, so his/her maximal ride time is set to 17 minutes (instead of 3 minutes) and his/her maximal daily ride time is set to 34 minutes.

Consequently, the maximal daily ride time is set by the following formula:

$$T_d^+ = max[T_d^- + 30; 1.5 * T_d^-] \quad (27)$$

This method to set the maximal daily ride time is specific to the NOMAd project.

4.1.5 Description of modification strategies

The modification of the initial data has three components: data processing, selection and new maximal ride time setting.

		Strategy							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Data proc.	avg value					x	x	x	x
	worst value	x	x	x	x				
Selection	worst user	x	x			x	x		
	bad users			x	x			x	x
Decrease	fixed	x		x		x		x	
	variable		x		x		x		x

Tableau 1 – Strategies for modifying the problem's data

Data processing aims to extract new information from the results. It can be applied or not depending on the chosen strategy. Further process is then based on the raw data or the processed data. When data processing is applied, the difference between the maximal daily ride time minus the mean of the daily ride times from all the solutions for each user is calculated ($T_r^+ - \sum_{c \in C} \frac{dailyRideTime_c}{|c|}$). The value obtained represents for each user his/her average daily ride time deviation from his/her maximal allowed daily ride time. A positive value indicates that in average, a user spends too much time in transports. A negative value indicates that in average, a user spend less than his/her maximal allowed ride time in transports. If the results are not processed, then the worst value from all the solution is considered for each user.

Selection is setting the scope of the initial data which is going to be modified. Two scopes have been explored: worst user and bad users. The worst user selection implies only selecting the user with the maximal deviation. The bad users selection implies selecting all the users that exceed their maximal daily ride time.

When the selection of users is complete, their maximal ride time value is decreased. This reduction happens only on a sub-request (morning or evening) depending on which sub-problem contributes the most to the maximal daily ride time constraint violation. For example, a user has a morning itinerary with small unaccepted excess ride time and an evening itinerary with huge unaccepted excess ride time, thus only the evening maximal ride time of this user is going to be decreased. The amount of the decrease can either be a fixed value ϵ, or a variable value ϵ_d. The variable value depends on the amount of constraint violation of the selected user. The bigger the constraint violation, the greater the reduction.

The table 1 describes the 8 strategies that have been tested. Strategy 0 designates a simple morning and evening sub-solutions combination without processing any further optimization.

5 RESULTS

The results are demonstrated using one example but other instances of the problem show similar outcomes. The example has 67 users and 134 requests. The experiments

were run on a laptop computer with an Intel(R) Core(TM) i5-4310U CPU @ 2.00 GHz processor and 7.90Go of RAM. The heuristic was coded in Python and the LNS was coded in C++.

5.1 Pareto fronts comparison

In a set of Pareto fronts, a Pareto is better than another Pareto if it has more non-dominated points on the lower daily cost interval. As we are not interested in high daily cost solutions, the higher daily cost interval is ignored by this method. The lower daily cost interval is the interval between the minimal daily cost in the set of Pareto fronts and the intermediate daily cost. The intermediate daily cost is the mean between the minimal and maximal daily costs in the set of Pareto fronts ($(cost_{max} + cost_{min})/2$). This concept is illustrated by a simple example in the figure 5. In the example, the blue Pareto has two non-dominated points in the lower daily cost interval and the red Pareto has one non-dominated points. This metric was used to compare the results.

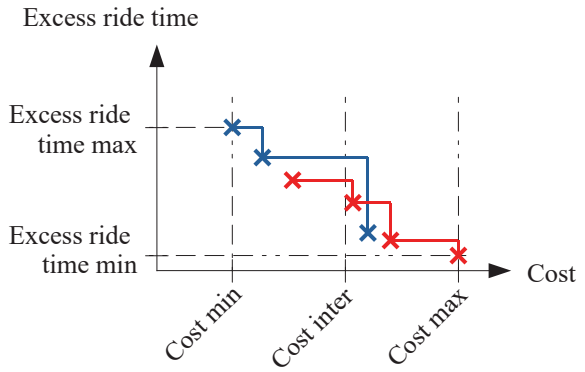


Figure 5 – Pareto fronts comparison using the intermediate daily cost

5.2 Heuristic performance and strategies comparison

First of all, whatever the strategy employed, the heuristic allow to find better solutions than a simple combination of morning and evening Pareto fronts (strategy 0). Obtained results have a wider range of non-dominated points and are more exhaustive. The figure 6 shows the obtained results for the previously cited example.

We discovered that some strategies lead in average to better solutions. Indeed, for the same parameters, some strategies give in average more non-dominated points. By running the set of experiments we had, we obtained the results presented in the table 2. The strategy 0 designate the simple combination of sub-solution without further optimization. The strategy that shows the best results is the strategy 1 in which the worst user is selected based on raw data and the amount of reduction is a fixed value. In average, this strategy allows to find 14.8 non-dominated points in the lower daily cost interval. It is five points more than the second best strategy.

Strategy	average number of non-dominated points
0	1.9
1	14.8
2	8.3
3	8.6
4	6.5
5	9.1
6	5.2
7	6.6
8	6.2

Tableau 2 – Average number of non-dominated points comparison

6 CONCLUSION

In this paper, we presented a new approach for solving a multi-trip dial-a-ride problem with dependent requests. We showed that the maximal daily ride time constraint greatly increases the complexity of the problem as it creates dependencies between the requests. The heuristic developed to solve this problem generates a set of non-dominated feasible global solution. Applied to real cases, the person in charge to organize the routes can select the best solution based on the heuristic results and his/her practical experience. Every strategy showed an improvement in the global solution. However, we discovered that the parameters of the heuristic (LNS runtime, number of computed points in a sub-Pareto, decrease value, ...) has a great influence on the final results. Further research can address this issue by finding the relationship between the parameters, the studied instance and the results. This would allow finer tuning of the parameters for each problem.

REFERENCES

Azi, Nabila, Michel Gendreau, and Jean-Yves Potvin, 2007. "An exact algorithm for a single-vehicle routing problem with time windows and multiple routes". In: *European Journal of Operational Research* 178.3, pp. 755–766.

Braekers, Kris, Katrien Ramaekers, and Inneke Van Nieuwenhuyse, 2016. "The vehicle routing problem: State of the art classification and review". In: *Computers & Industrial Engineering* 99, pp. 300–313.

Cordeau, Jean-François and Gilbert Laporte, 2007. "The dial-a-ride problem: models and algorithms". In: *Annals of Operations Research* 153.1, pp. 29–46.

Crainic, Teodor Gabriel, Michel Toulouse, and Michel Gendreau, 1997. *Towards a taxonomy of parallel tabu search algorithms*.

Ellegood, William A., Stanislaus Solomon, Jeremy North, and James F. Campbell, 2020. "School bus routing problem: Contemporary trends and research directions". In: *Omega* 95, p. 102056.

Gendreau, Michel, Jean-Yves Potvin, Olli Bräumlaysy, Geir Hasle, and Arne Løkketangen, 2008. "Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem and Its Extensions: A Categorized Bibliography". In: *The Vehicle Routing*

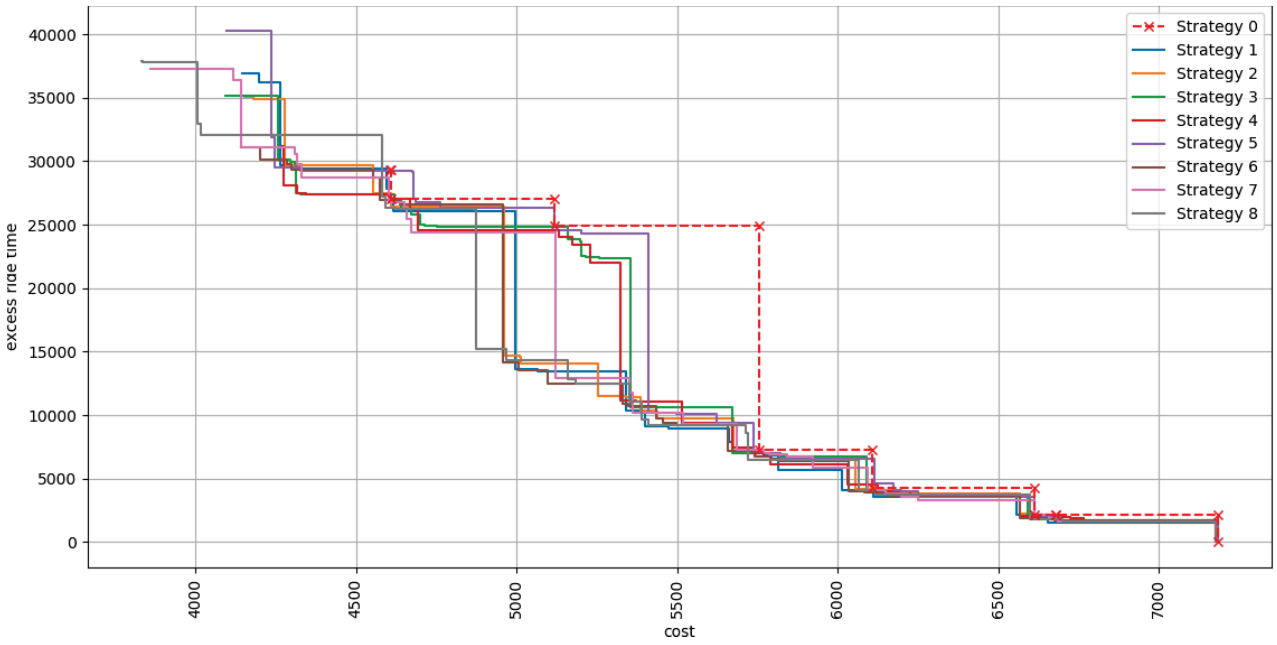


Figure 6 – Strategies comparison

Problem: Latest Advances and New Challenges. Operations Research/Computer Science Interfaces. Boston, MA: Springer US, pp. 143–169.

Golden, Bruce, Arjang Assad, Larry Levy, and Filip Gheysens, 1984. "The fleet size and mix vehicle routing problem". In: *Computers & Operations Research* 11.1, pp. 49–66.

Hernandez, F., D. Feillet, R. Giroudeau, and O. Naud, 2014. "A new exact algorithm to solve the multi-trip vehicle routing problem with time windows and limited duration". In: *4OR* 12.3, pp. 235–259.

Ho, Sin C., W. Y. Szeto, Yong-Hong Kuo, Janny M. Y. Leung, Matthew Petering, and Terence W. H. Tou, 2018. "A survey of dial-a-ride problems: Literature review and recent developments". In: *Transportation Research Part B: Methodological* 111, pp. 395–421.

Jaw, Jang-Jei, Amedeo R. Odoni, Harilaos N. Psaraftis, and Nigel H. M. Wilson, 1986. "A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows". In: *Transportation Research Part B: Methodological* 20.3, pp. 243–257.

Lim, Andrew, Zhenzhen Zhang, and Hu Qin, 2016. "Pickup and Delivery Service with Manpower Planning in Hong Kong Public Hospitals". In: *Transportation Science* 51.2, pp. 688–705.

Macedo, Rita, Cláudio Alves, J. M. Valério de Carvalho, François Clautiaux, and Saïd Hanafi, 2011. "Solving the vehicle routing problem with time windows and multiple routes exactly using a pseudo-polynomial model". In: *European Journal of Operational Research* 214.3, pp. 536–545.

Mavrotas, George, 2009. "Effective implementation of the -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems". In: *Applied Mathematics and Computation* 213.2, pp. 455–465.

Psaraftis, Harilaos N., 1983. "An Exact Algorithm for the Single Vehicle Many-to-Many Dial-A-Ride Problem with Time Windows". In: *Transportation Science* 17.3, pp. 351–357.

Tellez, Oscar, Laurent Daguet, Fabien Lehuédé, Thibaud Monteiro, Geovanny Osorio Montoya, Olivier Péton, and Samuel Vercraene, 2020. "A stakeholder oriented approach to the optimization of transports of people with disabilities". In: *Supply Chain Forum: An International Journal* 0.0, pp. 1–10.

Tellez, Oscar, Samuel Vercraene, Fabien Lehuédé, Olivier Péton, and Thibaud Monteiro, 2018. "The fleet size and mix dial-a-ride problem with reconfigurable vehicle capacity". In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 91, pp. 99–123.

Toth, Paolo and Daniele Vigo, 1997. "Heuristic Algorithms for the Handicapped Persons Transportation Problem". In: *Transportation Science* 31.1, pp. 60–71.

Ulusoy, Gündüz, 1985. "The fleet size and mix problem for capacitated arc routing". In: *European Journal of Operational Research* 22.3, pp. 329–337.

Wong, K. I. and Michael G. H. Bell, 2006. "Solution of the Dial-a-Ride Problem with multi-dimensional capacity constraints". In: *International Transactions in Operational Research* 13.3, pp. 195–208.

RETOUR D'EXPÉRIENCES EN INGÉNIERIE DES PARCOURS DE PATIENTS EN SITUATION COMPLEXE

Hervé PINGAUD [1,2]

(1) ISIS, INU Champollion,
Université de Toulouse, Castres, France
(2) Laboratoire de Génie Chimique, CNRS
INP Toulouse, Université de Toulouse, France
herve.pingaud@unif-jfc.fr

Elyes LAMINE [1,3]

(3) Centre Génie Industriel, IMT Mines-Albi
Université de Toulouse, Albi, France
elyes.lamine@univ-jfc.fr

RÉSUMÉ : *Si la notion de parcours du patient tend à structurer pertinemment l'organisation des soins en France, il est intéressant de mener une réflexion sur ses limites de fonctionnement. Qualité et continuité de prise en charge sont les objectifs visés par un parcours. Pourtant, la réalité opérationnelle montre que s'il est aujourd'hui essentiellement opérationnel dans les situations les plus délicates, il ne réussit pas à couvrir l'ensemble des besoins. Il existe une frange de population qui échappe aux bénéfices attendus d'un tel dispositif de prise en charge alors que ce besoin de continuité est vital. C'est cette extrémité qui est étudiée avec le parti pris d'un recours à la théorie des systèmes complexes. Outre la caractérisation théorique de cette complexité, nous proposons de tirer des enseignements acquis par une expérience d'ingénierie vécue sur le sujet au cours des deux dernières années. Le recours à la modélisation y a permis de capturer toutes les dimensions décrivant le patient en situation complexe, avec une volonté de couvrir un large spectre de cas. Les bases d'un dispositif innovant sont ensuite définies avec un modèle de processus de reprise en charge de tels patients, précautionneusement repérés et identifiés à l'aide d'un protocole d'évaluation.*

MOTS-CLÉS : *Système de santé, Système complexe, modèle conceptuel, évaluation des patients, situation complexe*

1 INTRODUCTION

La prise en charge à domicile offrant un nouveau cadre privilégié par la puissance publique dans l'organisation des soins, la relation ville-hôpital et les réseaux de santé y prennent une dimension différente. Il faut assurer continuellement, sur un territoire donné, une prise en charge de qualité de l'usager/patient, dans un système qui est donc de nature distribuée, alternant entre lieu de vie et lieux de soins. Cet objectif pour être atteint, doit s'appuyer sur un travail en équipe des professionnels de santé qui se mobilisent autour du patient et de son entourage, au meilleur de ses intérêts et en tenant compte évidemment de son profil et de ses besoins. La mise en oeuvre de telles organisations pose des difficultés en termes d'ingénierie, tant du côté de la demande de soins que de celle de l'offre de soins (Zhang et al. 2019, Lamine et al. 2019).

La diversité des situations nécessite en particulier des réagencements réguliers des services rendus par ces réseaux de soins parce qu'ils sont au contact des usagers au quotidien. Or cette capacité d'adaptation peut parfois atteindre des limites, un point critique où ils ne peuvent plus garantir la qualité et la sécurité de la prise en charge parce que le cas est si difficile que la réalisation des soins semble inappropriée.

De plus, puisque le lieu et les conditions de vie de l'usager fixent le contexte dans lequel le réseau doit intervenir, la situation sociale de l'usager est une connaissance indispensable pour la prise en charge. Les acteurs sociaux ont un rôle à jouer dans un réseau qui n'est plus seulement sanitaire, mais médico-social. Or, bien souvent, il est difficile de réunir les informations minimales pour agir de manière éclairée car les données sociales et médicales vivent dans des systèmes d'information en silo, qui communiquent peu et nécessitent souvent des opérations manuelles de consolidation de données lorsqu'on veut les réunir.

Au fil du développement de notre article, nous énonçons sous forme d'encadré des enseignements acquis de l'expérience vécue par les auteurs sur ces comportements limites.

> L'évaluation de la complexité en santé est encore limitée par la dispersion des données et le manque d'observabilité. Mais elle est factuelle dans le discours des professionnels de santé.

Ce qui s'apparente évidemment à une forme de complexité dans la prise en charge est une préoccupation des autorités de santé compétentes (Ministère de la Santé, Organismes professionnels). Ainsi, les gestionnaires de cas ou les plateformes territoriales d'appui sont déclarés aptes à intervenir dans ces cas extrêmes. Mais ces dispositifs ne partagent pas réellement de communautés de pratiques et souffrent d'un déficit de méthodes. Notre recherche vise à dresser un diagnostic des causes de ce déficit et à dégager des pistes

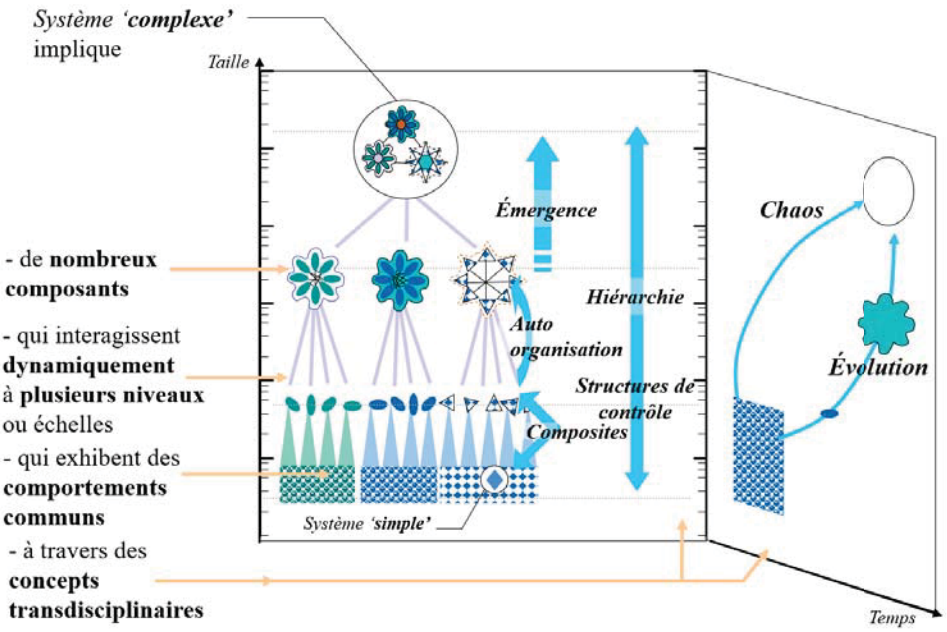


FIGURE 1 – Les caractéristiques des systèmes complexes – *Figure adaptée de (Clemens 1998)*

de recherche pour combler le handicap.

L'étude que nous présentons est née d'une réflexion initiée en 2018 conjointement par les auteurs et les membres de l'Association pour la Diffusion de la Médecine de Prévention (ADIMEP [1]) basée à Toulouse. Cette organisation spécialisée dans la médecine préventive a la volonté d'apporter des réponses complémentaires à l'offre de prise en charge existante, utilisant son haut niveau d'expertise médicale et son expérience en interventions par unités mobiles. Très vite, cette question de la nature complexe de certaines prises en charge s'est révélée être une perspective intéressante. Un projet a donc pris corps pour réaliser l'ingénierie d'un dispositif adapté à ce type de cas. Notre collaboration a visé deux objectifs : faire un travail de fond sur la caractérisation du patient en situation complexe, concevoir une nouvelle forme d'organisation adaptée à la reprise en charge sur son lieu de vie.

À la section 2, nous examinons la littérature scientifique sur le sujet de la complexité dans le système de santé. Puis, à la section 3, nous développons une approche conceptuelle pour caractériser la notion de patient en situation complexe. Cette caractérisation permet de proposer la mise en place d'un processus de traitement spécifique à la situation. Ces préconisations soulèvent des questions de recherche qui sont discutées en conclusion.

1. http://www.adimep.com/

2 LE TRAITEMENT DE LA COMPLEXITÉ DANS LES SYSTÈMES DE SANTÉ

2.1 La complexité comme propriété d'un système

Le qualificatif de complexe est souvent appliqué à des systèmes. Il décrit généralement un manque de maîtrise du système concerné (Genelot & Moigne 2017). Dans la mesure où il est difficile de modéliser ce qu'on ne connaît pas, l'acte de modélisation est inachevé. Seules des connaissances sur des représentations partielles de l'objet d'études l'alimentent. Depuis les travaux de Von Bertalanffy en 1968 (Bertalanffy 1968), un consensus s'est formé sur ce que sont les racines de cette complexité et dont les principales caractéristiques sont illustrées par la figure 1 :

- instabilité surprenante dans le comportement pouvant conduire jusqu'à des situations de chaos (Le Moigne 1999),
- poids des incertitudes, l'aléatoire limite toute tentative de prédiction du comportement. De nouvelles aptitudes ou façon d'être peuvent émerger spontanément en cours d'exécution (Morin 1977),
- nécessité de recourir à des théories à base de réseaux pour expliciter des principes de fonctionnement à partir des interactions entre composantes du système (Hutzler 2000),
- propriétés mathématiques éminemment singulières (variations dans les espaces d'états, fonctions d'état non continues et non linéaires, non dérivables, d'existence limitée à des sous espaces d'état).

Conscient des limites de toute rationalité, le chercheur investi dans la construction d'un modèle de représentation de système complexe applique le principe de séparation des

préoccupations. Il capture des fragments de connaissances du système sur des aspects spécifiques, et couve l'espoir que de la richesse prodiguée par ces dimensions, une fois réunies, surgira un progrès dans la maîtrise d'ensemble. L'ingénierie d'entreprise a cultivé cette approche en l'appliquant à l'organisation productive avec un succès certain (CIMOSA (AMICE 1993), ISO 19439 (ISO 2006), etc.). L'ingénierie système suit la même philosophie (Bonjour et al. 2019).

Cette tension qui s'installe entre conscience des connaissances acquises et inconscience des connaissances manquantes se traduit par une question : « Avons nous réellement affaire à un système complexe ? ». De fait, il est un niveau de connaissance à partir duquel il s'acquitte de cette identité complexe. Mais comment savoir qu'il est atteint autrement que par le risque encouru de l'exploiter sans le maîtriser ? C'est un sujet primordial quand l'ingénierie porte sur des systèmes critiques (ex : systèmes embarqués pour véhicule autonome).

La complexité est toujours définie par un seuil dans une échelle graduant une décroissance de la capacité à maîtriser le système. Ce seuil est repoussé par le progrès dans la connaissance.

De l'aptitude à pouvoir classer un système dans cette catégorie dépend la posture choisie ensuite par ceux qui sont en charge de son ingénierie comme l'affirme (Meinadier 1998).

Ce seuil de complexité est par essence difficile à définir car il faut intégrer les effets d'interactions multiples, d'incertitude, d'instabilité et de limite de prédiction, incluant des phénomènes d'émergence dans le comportement.

2.1.1 Projection dans les systèmes de santé

Dans leur ouvrage de référence, Rouse et Serban définissent globalement le système de santé comme un système complexe dont une caractéristique majeure est son besoin d'adaptation permanente (Rouse & Serban 2014). Cette complexité s'exprime en particulier dans le service de soins quand l'usager présente un profil poussant la prise en charge dans des limites opérationnelles.

Le système de santé ne déroge pas à la règle d'une vision systémique qui prime dans l'analyse de la complexité.

(Waldvogel et al. 2012) ont mené une étude assez approfondie sur une prise en charge holistique et intégrée de malades dits complexes. Ils estiment de 5 à 10% la prévalence de tels patients dans le cadre d'une pratique ambulatoire en Helvétie. Dans le tableau 1, nous avons établi une projection des facteurs de complexité évoqués précédemment sur des situations courantes dans un système de santé en nous inspirant de leurs travaux. Ces auteurs insistent sur la coexistence de multiples réseaux internes : « Lorsque plusieurs pathologies se retrouvent chez le même patient, les interactions entre les réseaux sont innombrables et impossibles à répertorier, le stade de résilience des systèmes peut être dépassé. Il naît de cette complexité des événements une nouvelle caractéristique du patient : son caractère unique, ce « je-ne-sais-quoi », qui le fait échapper à la médecine traditionnelle. Il faut alors du courage pour abandonner les directives conventionnelles, de l'empathie pour accepter les désirs du patient et de ses proches, enfin un nouvel état d'esprit pour gérer une équipe multidisciplinaire ».

Facteurs de complexité	Causes d'éligibilité dans un système de santé	Exemples de situations caractéristiques
Instabilité	Divergence des objectifs des acteurs et génération de conflits dans la définition des parcours de soins	Affectations de longues durées avec polypathologie pour des patients « ventouses », occupant régulièrement des lits dans différents services de spécialité de l'hôpital (bed blockers)
Incertitude	L'évolution d'un état de santé n'est jamais totalement prédictible. La disponibilité des ressources compétentes est parfois limitante. La volonté du patient peut changer de cap	Déficience en santé mentale du patient ne permettant pas de savoir s'il est conscient de son état et s'il souhaite se soigner. Non remplacement d'un médecin généraliste partant en retraite
Réseaux sophistiqués	Coexistence du réseau des acteurs médicaux, du réseau social autour de la personne, du réseau logistique des médicaments et dispositifs médicaux	Diversité des réseaux médico-sociaux et de leur périmètre d'actions Absence de dossier médico-social de l'usager partagé à l'échelle du système
Dynamiques singulières	Peu de points d'équilibre dans la dynamique, les comportements des acteurs sont aléatoires. Niveau d'autonomie des acteurs qui crée les conditions de comportements émergents et pas préparés	Retours multiples aux urgences, situation de détresse au domicile

Tableau 1 – Explicitation des facteurs de complexité dans un système de santé

La complexité est associée à une situation dans l'écosystème de prise en charge.

Dans son acception la plus large, le concept de parcours renvoie à une prise en charge globale et continue du patient. Il est propice à l'étude de la complexité dans la mesure

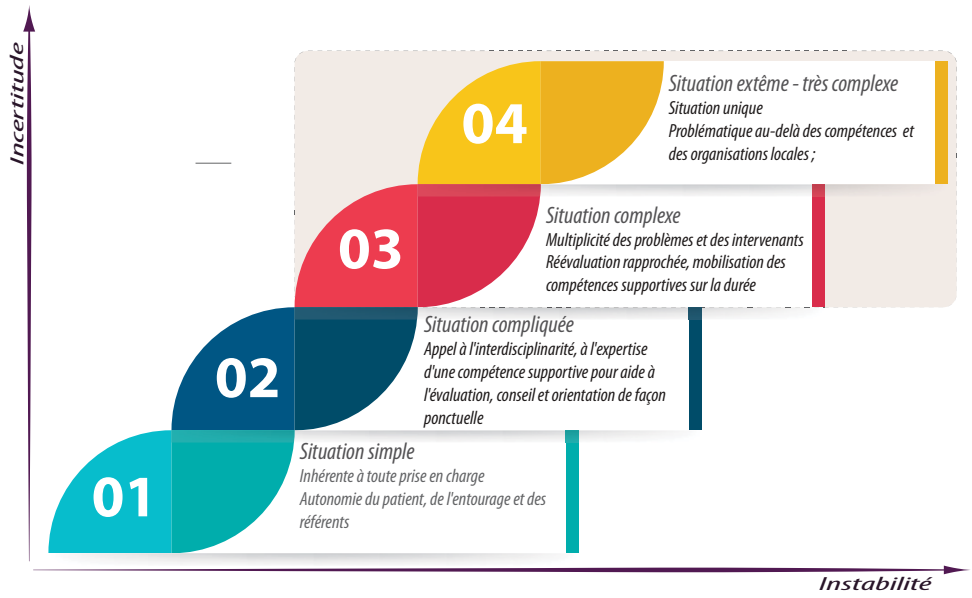


FIGURE 2 – Schéma de principe de la gradation en quatre classes des difficultés de prise en charge d'un patient

où il cultive une vision systémique, avec un large horizon d'observation à la fois dans l'espace et dans le temps, d'une part, et constitue l'enveloppe dans laquelle la coordination s'exerce, d'autre part (SGMCAS 2016, Benabdejlil 2016, Calvez 2019).

> Le parcours de soins est le creuset dans lequel il faut traiter des situations complexes.

Actuellement, la réalité opérationnelle du parcours n'est pas ancrée dans les pratiques professionnelles du système de santé. Le parcours n'a factuellement de réalité qu'à partir d'un certain niveau de complexité. Ce niveau de complexité est lui même appréhendé de manière plus intuitive que rationnelle, reposant sur le sentiment que le problème s'étale dans le temps et que l'on a des difficultés à le résoudre. Quelle fracture entre cette absence de pragmatisme, d'une part, et l'importance donnée aux dispositifs de prise en charge consacrés à la complexité, d'autre part !

> Il n'existe pas de solution largement partagée pour la prise en charge de ces situations complexes.

La Haute Autorité de Santé (HAS) reconnaît des gradations dans l'évaluation de la complexité, non pas d'un patient, mais d'une situation dans laquelle le patient se trouve. Dans chaque cas, les intervenants devront adapter la fréquence d'actualisation d'un plan personnalisé de coordination des soins (PPCS) (HAS 2019b). Douze cas pratiques ont fait l'objet d'une publication de la HAS décrivant l'usage de ce PPCS dans des situations très variées (HAS 2019a). Ils montrent toute la diversité des situations.

> La complexité d'une situation est multifactorielle, mêlant des observations de nature psychologique, sanitaire et sociale.

Sur la figure 2, quatre catégories de situation sont décrites selon les niveaux d'incertitude et d'instabilité qui pèsent sur le système, pointant une difficulté croissante dans l'instruction d'un dossier au fil de l'augmentation des valeurs de ces deux facteurs, pour concevoir un PPCS qui devrait être durable. Mais les échelles des axes de cette figure ne sont pas précisément définies, ni reliées par des règles aux critères choisis pour la conception. Ce type de figure qui a un caractère culturel, reste peu utile pour qui veut organiser une prise en charge avec une certaine précision. On ne peut se contenter de cette représentation pour alimenter notre étude. Actuellement, pour la réglementation sur le territoire français, ce sont les plate-formes territoriales d'appui qui ont la compétence requise sur ces classes 3 et 4. Elles sont sollicitées sur la foi d'un acteur de premier recours sans règles réellement formelles. Mais sont elles réellement en mesure d'agir sur la classe 4 ?

Force est de constater que les acteurs investis dans le développement de ces plate-formes souffrent d'une absence de méthodologie et d'outils mis à leur disposition. Leur pratique relève souvent d'une improvisation locale, alors qu'ils sont naturellement placés au centre d'un réseau d'acteurs qui doivent partager des principes et règles de fonctionnement. Le secteur sanitaire et social calibre en général la réponse apportée à des besoins de prise en charge par des échelles d'évaluation qui guident l'orientation du patient. Nous pouvons citer l'échelle numérique (EN [2]) de

2. https://www.sfetd-douleur.org/wp-content/uploads/2019/08/notice_-_echelle_numerique.pdf

la douleur, MNA [3] (Mini Nutritional Assessment) de la nutrition, les grilles AGGIR [4] pour la mesure de l'autonomie, ou encore FRENCH [5] pour le degré d'une urgence, à titre d'exemple. La même logique existe dans l'évaluation sociale, citons le référentiel InterRAI [6], par exemple. Ces échelles sont précises et souvent associées à un questionnaire. Nous nous sommes appropriés cette pratique d'évaluation.

3 APPROCHE ADOPTÉE

3.1 Caractérisation de la situation complexe

Nous avons recours à la modélisation afin de dresser de manière cohérente et synthétique une galerie des portraits de situations complexes.

> La prévalence de ces situations n'est pas connue du fait d'un manque de définition des déterminants de santé de la population, déterminants dont les épidémiologistes ont besoin pour quantifier.

Des cas cliniques de patients ont été recueillis dans des structures médico-sociales. Ces derniers ont été analysés et ont permis d'identifier des paramètres communs aux cas complexes. Comme illustré par la figure 3, le modèle conceptuel qui en a résulté est fondé sur les relations entre trois dimensions, . La première dimension réunit les connaissances sur le vécu du *parcours de soins* de l'usager prenant en considération son profil et son environnement. La seconde dimension aborde la *structure de l'offre de soins*, incluant l'entité en charge de la coordination des ressources. Dès lors, la caractérisation de la *complexité* est considérée comme une troisième dimension n'ayant de sens qu'en relation avec les deux autres dimensions. Ce n'est pas le patient qui est complexe, nous dirons que c'est la situation dans laquelle il se trouve qui est complexe.

> La modélisation à un niveau conceptuel de la situation complexe n'a pas été réalisée auparavant, or un maillage de concepts fournit une vue à 360° extrêmement utile.

Le patient présente un niveau de complexité en fonction de son état de santé, de sa situation psycho-sociale, au sein d'un parcours de soins. Nous présentons plus en détail dans le tableau 2 cette dimension relative à la complexité.

3. https://www.mna-elderly.com/forms/MNA_french.pdf
4. https://www.cnsa.fr/documentation/guide_aggir_2008.pdf
5. https://www.sfmu.org/fr/vie-professionnelle/outils-professionnels/referentiels-sfmu/referentiel-grille-french-2018-de-triage-ioa-version-1-1/ref_id/39
6. https://maia-aisne-nord.fr/pdf/ASIP-CNSA_OEMD_Kit-Information_Pr\%C3\%A9sentation_V0.1.0.pdf

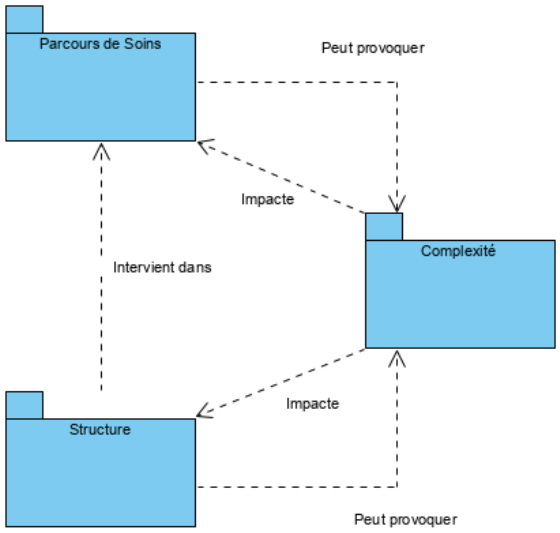


FIGURE 3 – Structuration du modèle conceptuel

Composante	*Description*
Complexité médicale	Le patient présente un niveau de complexité médicale qui est lié à ses pathologies et aux traitements associés.
Complexité de spécialité	La discipline médicale compétente varie en fonction de la pathologie et de l'organe affecté (ex : neurologie, urologie)
Complexité psycho-sociale	Le patient présente un niveau de complexité psycho-sociale en fonction de ses conditions de vie et de ses relations sociales.
Complexité sociale	Il s'agit d'une complexité liée à l'environnement social dans lequel le patient vit.
Complexité psychologique	Il s'agit d'une complexité associée au profil psychologique du patient, les éléments de sa personnalité qui sont impactants.

Tableau 2 – Facteurs contribuant à la complexité d'une situation

Le modèle conceptuel de la figure 4 est un diagramme de classe en langage UML capturant les connaissances sur la complexité dans le rectangle central en traits pointillés. De part et d'autre, deux paquets l'encadrent : les structures à gauche et le parcours à droite. Nous ne détaillons pas ici ces deux paquets, seules les classes en interface sont explicitées.

Nous avons renseigné les classes du paquet complexité avec des attributs qui entrent en ligne de compte quand il faut évaluer un niveau de complexité. Des opérations viennent compléter ces attributs, elles indiquent des données qu'il faut aller chercher pour compléter l'évaluation. Ces opérations sont appelées autant que de besoin, selon la dynamicité de la situation complexe.

3.2 Définition d'une échelle d'évaluation

Créer une échelle d'évaluation est une difficulté en soi. L'usage dans les échelles médicales et sociales est de produire un indicateur unique, souvent associé à une échelle qualitative. Cette solution impose de choisir une méthode d'agrégation des facteurs contributifs de la complexité qui

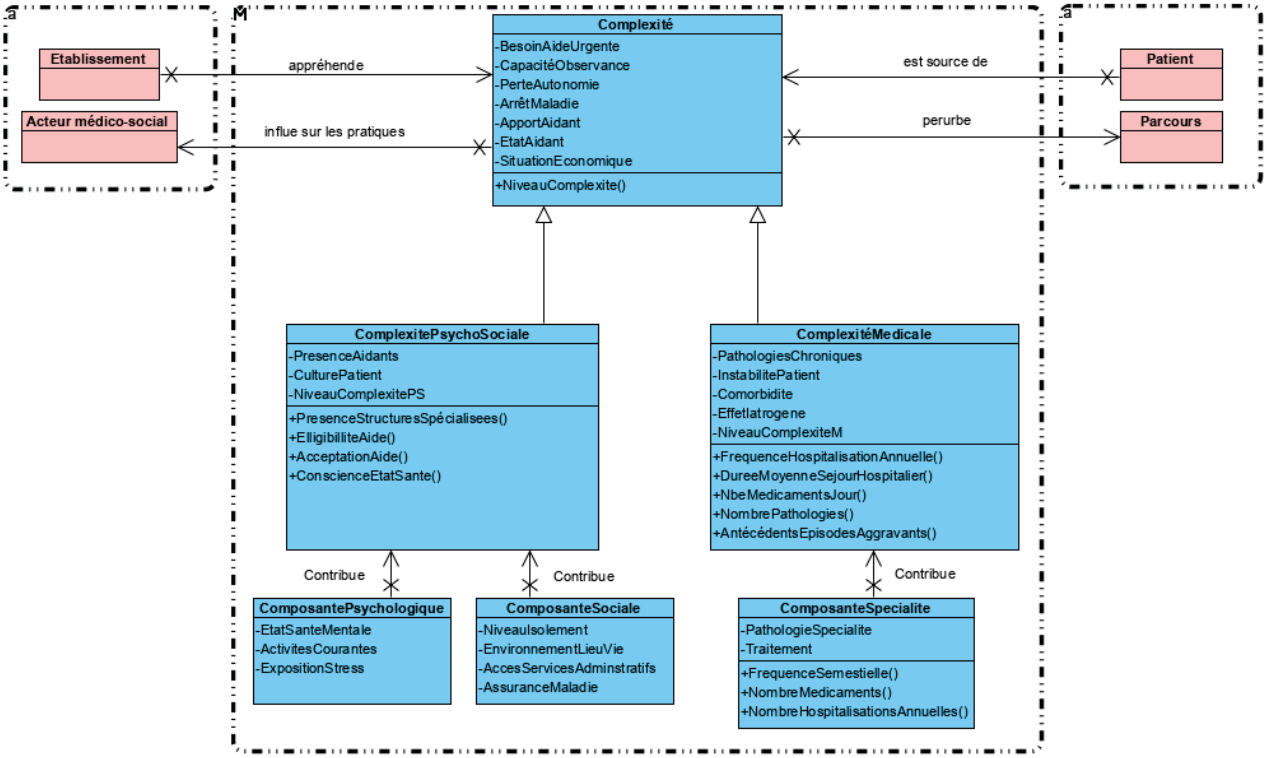


FIGURE 4 – Modèle conceptuel du paquet « Complexité »

sont consignés dans le modèle conceptuel de la situation complexe.

L'inclusion de patient dans la cohorte des situations complexes relève d'un protocole d'évaluation très spécifique.

Il faut appliquer une forme mathématique qui permette de synthétiser les variables de base. Une moyenne peut être choisie, en prenant soin de préserver des équilibres entre les termes de la somme par des jeux de pondération dont le choix des valeurs est toujours un exercice subtil. Mais une autre manière d'aller vers une échelle est de respecter le caractère multifactoriel de la complexité en préservant les dimensions représentatives de la complexité. Cela conduit à une présentation sous forme de graphique en radar avec des profils type de complexité. Dans ce cas, la notion de seuil devient plus floue.

Un outil logiciel a été conçu avec ADIMEP pour réaliser des questionnaires permettant de recueillir les données pour l'évaluation et de les stocker dans une base. De cette base de données, nous avons prévu des exportations pour alimenter un logiciel d'analyse de données, qui permettra de bâtir des tableaux de bord dans lesquels ces différentes techniques d'agrégation pourraient être testées.

3.3 Inclusion dans le processus de prise en charge

La singularité du problème de prise en charge tient dans la difficulté d'assurer une continuité d'activités au sein du parcours. Par son caractère critique, cette situation complexe s'apparente à une situation de crise. Il n'est plus question de prise en charge, mais de reprise en charge. Car chacun doit être averti de la difficulté qui se présente et qui est apprise du passé. Le repérage de ces patients est donc une problématique pour laquelle il peut être utile de mandater des professionnels de divers métiers pour endosser un rôle de lanceurs d'alerte, c'est à dire de scrutateurs d'événements significatifs d'un décrochage. La figure 5 illustre la cartographie de processus de reprise en charge du patient en situation complexe comme nous l'avons envisagée.

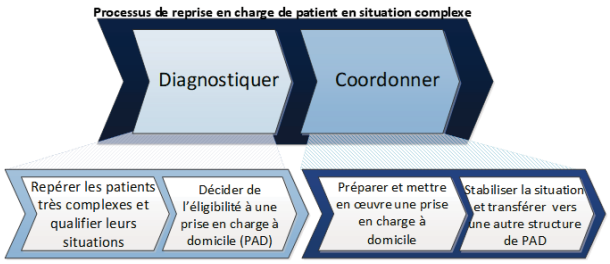


FIGURE 5 – Cartographie de processus de reprise en charge du patient en situation complexe

Le repérage de patient complexe nécessite un dispositif très particulier.

L'organisation doit ensuite passer le relais à un guichet intégré pour opérer une évaluation telle que discutée supra. En cas de décision d'inclusion, une coordination explicite doit être établie entre les acteurs. Le processus de prise de décision est collectif et doit aboutir à élaborer des PPCS avec un suivi très serré par une équipe expérimentée. Ce schéma organisationnel s'apparente à ce qui a pu déjà être expérimenté sur les personnes âgées dans le cadre du programme PAERPA [7]. Ici, la différence réside dans la dissociation d'une population ciblée, les patients en portefeuille n'ont pas d'autres critères d'inclusion que ceux des étapes amont.

Le processus de prise en charge de la situation complexe est un processus de continuité d'activités visant à la reprise en charge d'un décrocheur, ses étapes amont sont les plus difficiles à concevoir.

Insistons sur la possibilité, et même sur l'objectif poursuivi par ce dispositif, de franchir le fameux seuil de complexité en sens inverse. Un patient est entré dans le portefeuille des situations complexes, il peut en sortir. Dans une vision éthique, on peut même suggérer que tout doit être fait pour qu'il en sorte. Auquel cas, il rejoint le cours normal des prises en charge qui sont sous contrôle et la suite est déléguée aux ressources territoriales « classiques ». Cela justifie l'emploi de cette qualification de reprise en charge Dans un cadre d'ingénierie organisationnelle menant à la définition de ce guichet unique, il est attendu :

- la définition des règles de gestion qui guideront la conception du parcours conceptuel à un niveau plus détaillé que celui de notre cartographie. Il s'agit alors de normaliser des pratiques et d'en assurer une large diffusion,
- la mise au point des algorithmes qui aideront à pratiquer le « case management » à partir de ces fondements. La dérivation du modèle conceptuel de parcours en un modèle opérationnel de parcours pour un patient donné devient l'enjeu. Ces algorithmes peuvent être basés sur la recherche d'une solution parmi une combinaison des possibilités de prise en charge pré-établies et la vérification de la possibilité de mobiliser les ressources de tout type qu'elle engagera.

4 CONCLUSIONS

Ne s'écartant pas des canons définissant les systèmes complexes, le système de santé est qualifiable de complexe. Dans ses missions opérationnelles, il engendre des situations complexes pour des patients qui sont souvent en limite de prise en charge, rejetés et dans une forme de décrochage vis à vis du continuum de soins. Bien que la prévalence de ces situations ne soit pas connue, de nombreux témoignages attestent de l'existence de ces cas. L'ingénierie de parcours de patients en situation complexe vise à concevoir et déployer des dispositifs adaptés à ce sujet singulier.

Nous faisons un retour d'expériences vécues au sein d'un projet ayant l'ambition de proposer un dispositif de reprise en charge de ces patients en situation complexe. L'accent est mis sur la caractérisation de la situation afin de pouvoir évaluer avec une certaine rationalité si un patient relève de cette catégorie. Les caractères instable et incertain de ces situations font qu'une telle ambition est un vrai challenge scientifique. Nous avons proposé un modèle conceptuel pour capturer de manière structurée les multiples éléments de connaissance contribuant à l'évaluation d'une telle situation. À partir de ce modèle, nous avons pu penser un protocole d'évaluation associé à un questionnaire. Nous avons situé l'emploi de ce dernier dans un processus spécifique à ce type de situation. Les étapes de repérage des candidats à l'inclusion dans cette catégorie, puis l'identification de leur profil afin de préparer un PPCS lorsqu'ils sont repris en charge, ont focalisé nos efforts.

Ce premier pan de nos travaux ouvre de nombreuses perspectives en termes de recherche. Nous pouvons évoquer les pistes suivantes :

- mettre en application nos propositions à titre expérimental sur des territoires pilotes afin de juger de leur pertinence et de pouvoir mener des statistiques sur la prévalence de ces situations,
- aider à la prise de décision dans la collaboration entre intervenants potentiels pour bâtir un PPCS, non pas à partir de la page blanche, mais dans une logique de raisonnement à base de cas et de règles métier appliquées avec discernement à des solutions génériques pré existantes,
- appliquer des techniques issues de travaux sur le principe de continuité d'activités pour aider la révision des PPCS en minimisant les effets de rupture de soins pour le patient (Rejeb et al. 2014),
- informer et former les acteurs du sanitaire et du social des caractéristiques de la situation complexe et des spécificités des pratiques de reprise en charge (alerter, évaluer, inclure, reprendre),
- convaincre les instances en charge de la régulation du système de santé publique de la pertinence de ces nouveaux dispositifs, une fois leur valeur démontrée, pour passer à l'échelle.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les Professeurs Roland Bugat et Jacques Ghisolfi de l'ADIMEP pour leur engagement dans ce projet. L'apport de Mlle Gabrielle Aussel, élève ingénieur de l'École d'ingénieurs ISIS de Castres, dans l'analyse des

7. Personnes Âgées en Risque de Perte d'Autonomie – https://www.has-sante.fr/jcms/c_1638463/fr/plan-personnalise-de-sante-pps-paerpa

cas et la conception du méta-modèle, a été déterminant.

REFERENCES

Références

AMICE, E. C. (ed.) (1993). *CIMOSA : Open System Architecture for CIM*, Project 688/5288. AMICE, 2 edn, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Benabdejlil, H. (2016). *Modeling of healthcare processes : towards an implementation of new value-added services*, Thèse de doct., Université de Bordeaux.

Bertalanffy, L. V. (1968). *General System Theory : Foundations, Development, Applications*, George Braziller Inc.

Bonjour, E., Krob, D., Palladino, L. & Stephan, F. (eds) (2019). *Complex Systems Design & Management : Proceedings of the Ninth International Conference on Complex Systems Design & Management, CSD&M Paris 2018*, Springer International Publishing.

Calvez, C. (2019). Parcours (de soins, de santé, de vie) et Coordination. Dossier Documentaire, *Technical report*, École des hautes études en santé publique (EHESP), Paris, France.

Clemens, M. (1998). Visual : Visualizing Complex Systems Science.
URL: *https ://necsi.edu/visualizing-complex-systems-science*

Genelot, D. & Moigne, J. (2017). *Manager dans (et avec) la complexité*, Eyrolles.

HAS (2019a). Exemples de ppcs complétés à partir de cas pratiques, *Technical report*, Haute Autorité de Santé.

HAS (2019b). Modèle de plan personnalisé de coordination en santé, *Technical report*, Haute Autorité de Santé.

Hutzler, G. (2000). *Du Jardin des Hasards aux Jardins de Données : une approche artistique et multi-agent des interfaces homme/systèmes complexes*, PhD thesis, Paris 6.

ISO (2006). Iso 19439 :2006 enterprise integration-framework for enterprise modelling, *International Standards Organization, Geneva, Switzerland* .

Lamine, E., Bastide, R., Bouet, M., Gaborit, P., Gourc, D., Marmier, F., Pingaud, H., Schneider, M. & Toumani, F. (2019). Plas'O'Soins : An Interactive ICT Platform to Support Care Planning and Coordination within Home-Based Care, *IRBM* **40**(1) : 25–37.

Le Moigne, J.-L. (1999). *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, Paris.

Meinadier, J.-P. (1998). *Ingénierie et intégration des systèmes*, Hermes Science Publications, Paris.

Morin, E. (1977). *La méthode, tome 1 : La Nature de la nature*, Seuil, Paris.

Rejeb, O., Lamine, E., Bastide, R. & Pingaud, H. (2014). Vers un management de la continuité d'activité dirigé par les modèles : application à la prise en charge à domicile, *MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France.

Rouse, W. B. & Serban, N. (2014). *Understanding and Managing the Complexity of Healthcare*, 1 edn, The MIT Press.

SGMCAS (2016). Parcours De Soins, Parcours De Santé, Parcours De Vie Pour une prise en charge adaptée des patients et usagers – Lexique des parcours de A à Z, *Technical report*, Ministère des affaires sociales et de la santé et des droits des femmes, Paris, France.

Waldvogel, F. A., Balavoine, J.-F., Perone, N. & Schusselé-Fillietaz, S. (2012). Les malades complexes : de la théorie des systèmes complexes à une prise en charge holistique et intégrée, *Rev Med Suisse* **8** : 1022–4.

Zhang, L., Lamine, E., Fontanili, F., Bortolaso, C., Derras, M. & Pingaud, H. (2019). A decision-making support system for operational coordination of Home Health Care services, *AICCSA 2019 - 16th International Conference on Computer Systems and Applications*, IEEE, Abu Dhabi, UAE.

ETUDE DES CRITERES D'OPTIMISATION POUR LA REPLANIFICATION DE CHAINES D'ASSEMBLAGE AERONAUTIQUES

D. LOVATO, R. GUILLAUME, C. THIERRY,

IRIT – Université de Toulouse - 31400
TOULOUSE France
damien.lovato@univ-tlse2.fr
romain.guillaume@irit.fr
caroline.thierry@univ-tlse2.fr

O. BATTAIA

KEDGE Business School
BORDEAUX France
olga.battaia@kedgebs.com

RESUME : *Dans cet article, nous considérons le problème de replanification des processus d'assemblage aéronautique en réponse à une interruption causée par un aléa. Le problème d'ordonnancement étudié doit tenir compte des contraintes de précédence et de ressources (par ces aspects il est proche de celui de la formulation classique du Resource Constrained Project Scheduling Problem) mais aussi d'autres contraintes comme la considération des métiers des opérateurs, leurs compétences et la gestion des zones de travail. Notre objectif est d'étudier différents critères d'optimisation qui peuvent être utilisés dans ce contexte afin de fournir une aide aux manageurs en charge de la replanification. Nous présentons un modèle de Programmation Par Contraintes (PPC) pour le problème considéré en implémentant plusieurs fonctions multi-objectifs proposées. Les performances de ces fonctions sont testées sur un ensemble d'instances issues du terrain. Nous discutions ainsi l'impact de chaque critère sur les caractéristiques des solutions trouvées lors de la résolution.*

MOTS-CLES : *RCPSP, gestion d'aléas, réactif, PPC, multi-objectifs.*

1 CONTEXTE DU PROBLEME ETUDIE

De nos jours, l'ordonnancement des systèmes de production est de plus en plus complexe et présente des nombreuses sources d'incertitude. Ces incertitudes sont liées à des aléas divers et variés perturbant les plannings de production établis au préalable. Ces aléas peuvent engendrer des coûts de production supplémentaires voire un arrêt de production et ont ainsi un impact non négligeable sur les performances des systèmes de production. Afin d'anticiper leurs conséquences négatives, l'étude de leur gestion a fait naitre de nombreuses approches du génie industriel et de la recherche opérationnelle.

Le secteur de l'aéronautique est fortement concerné par la gestion des aléas. Assembler un avion est un processus long et couteux. De plus, chaque modèle d'avion possède un processus d'assemblage particulier et les exigences en termes de qualité sont très encadrées par les critères de certification. Ces contraintes doivent être prises en compte lors de la planification des tâches, ce qui consiste à indiquer à quel moment chaque tâche doit être commencée et par quel opérateur. Etant donné que le nombre de tâches à planifier peut être très significatif, entre centaines et milliers de tâches par poste de travail, des algorithmes de planification automatiques sont nécessaires afin d'aider les manageurs dans leur prise de décision. Afin d'obtenir des solutions satisfaisantes par l'application de ces algorithmes, leur conception doit tenir compte de nombreuses contraintes techniques et managériales du terrain.

L'affectation des tâches aux opérateurs doit respecter les compétences acquises par chaque opérateur et son appartenance au même corps de métier que celui requis par la tâche. De plus, les opérateurs travaillant en équipe ont des affinités sociales qui doivent être prises en compte lors de la répartition des tâches afin d'améliorer le bien-être au travail du personnel et indirectement la qualité de travail de celui-ci.

Une façon possible de procéder est d'affecter les membres d'une équipe à la même famille de tâches. Dans le processus d'assemblage, les tâches sont regroupées sous forme de familles qui représentent l'assemblage d'un élément fonctionnel complexe. Il sera préférable d'affecter un opérateur à un nombre limité de familles de tâches, afin de diminuer sa charge cognitive liée au changement du contexte particulier pour chaque famille de tâches. En même temps, il sera aussi préférable dans la mesure du possible que le même opérateur commençant l'assemblage d'un élément complexe finalise le traitement des tâches de la même famille et que les membres de la même équipe travaillent sur les tâches de la même famille.

Pour réaliser une tâche, il est parfois nécessaire de recourir à des équipements particuliers disponibles. La disponibilité de tels outils doit donc constamment être vérifiée. Il en est de même pour la disponibilité de chaque opérateur qui a ses propres horaires pré définies.

Enfin, il est nécessaire de prendre en compte l'existence de zones de travail. Ces zones peuvent être situées au sol tout comme dans certaines parties de l'avion. Chaque tâche s'effectue sur une ou plusieurs zones, et le nombre d'opérateurs présents simultanément dans chaque zone de travail est limité par l'espace disponible pour que les opérateurs puissent effectuer leur travail sans se gêner mutuellement.

Le problème de planification initial présente déjà une complexité accrue à cause de ces nombreuses contraintes et spécificités. Lorsque celui-ci est remis en cause par un aléa (par exemple l'impossibilité de réaliser une tâche à cause de l'absence de l'opérateur, la pièce à assembler ou un problème de qualité constaté), il est urgent de replanifier l'exécution des tâches restantes en tenant compte de cet empêchement afin de ne pas trop retarder la finalisation de l'assemblage tout en cherchant une solution pour l'aléa présent (afin de rendre possible la réalisation de la tâche entravée). A la complexité du problème s'ajoute donc la contrainte temporelle de la prise de décision pour répondre aux aléas survenus. Dans ce papier, nous développons des méthodes de planification qui peuvent être utilisées dans ce contexte.

Le reste du papier est organisé ainsi : la section 2 est dédiée à l'étude de la littérature et notre positionnement dans l'état de l'art. Dans la section 3, nous présentons notre modèle de Programmation Par Contraintes (PPC). Les résultats des expérimentations sur des instances inspirées du terrain sont analysées dans la section 4. Nous terminons sur comparaison des différents critères qui peuvent être utilisés pour résoudre le problème étudié en analysant leur efficacité.

2 ETUDE DE LA LITTERATURE

La présence dans le problème d'ordonnancement étudié de ressources renouvelables en quantité limitée et la notion de précédence entre les tâches fait référence à un problème type du RCPSP (Resource Constrained Project Scheduling Problem). Cependant, les nombreuses autres contraintes indiquent que la formulation classique du RCPSP n'est pas suffisante. De plus, comme expliqué précédemment, les incertitudes sont nombreuses dans le contexte de l'assemblage aéronautique, et les aléas peuvent subvenir à tout moment et ralentir voire arrêter la réalisation des tâches pour une durée indéterminée. L'approche à proposer aux managers doit en tenir compte.

Pour analyser l'impact des incertitudes, Hazir et Ulusoy (2019) les ont classifiées en fonction de leurs sources, qui peuvent être aussi bien externes qu'internes. Leur étude montre que les incertitudes peuvent être d'origine organisationnelle (au niveau du management), liées aux ressources utilisées, à la nature du travail ou encore à la logistique en amont. Les conséquences possibles de ces incertitudes entrainent l'impossibilité de démarrer une ou plusieurs tâches comme prévu. Une revue des approches permettant de gérer ces incertitudes a été également présentée dans cette étude mais aussi dans les travaux de Chaari et al. (2014) où des méthodes proactives, réactives et hybrides ont été présentées. Nous pouvons trouver par exemple le « right shift scheduling » qui consiste à décaler l'ensemble des tâches affectées par l'aléa plus tard dans l'ordonnancement. Cela permet de conserver la structure de la solution en conservant l'ordre des affectations mais présente peu d'opportunités d'amélioration de solution.

Dans le contexte que nous étudions, les manageurs ont besoin d'une approche réactive. Celle-ci intervient en réaction à un aléa perturbant le bon déroulement du planning de l'assemblage. Son objectif est par conséquent de déterminer une solution faisable rapidement afin que le processus d'assemblage puisse reprendre rapidement.

Une approche réactive peut englober plusieurs méthodes. L'une d'entre elles, présentée par Zhu et al. (2005), utilise un modèle de type PLNE (Programme Linéaire en Nombres Entiers) qui prend en compte plusieurs solutions prédéterminées pour s'adapter à certains types d'aléas. Kuster et al. (2008) ont introduit le concept des tâches alternatives avec des états d'activation. Cela leur permet de gérer ainsi une plus grande variété d'aléas avec un seul modèle qui leur offre différents paternes de formulation (alternation de mode d'exécution, de ressource ou de capacité, insertion/suppression d'une tâche, flexibilité de l'ordre d'exécution et sérialisation ou parallélisation des tâches).

Dans ce papier, nous proposons un ensemble de critères pouvant être appliqués dans ce cas et nous étudions leur efficacité. L'analyse des objectifs considérés lors de la planification initiale a été réalisée par Hartmann et Briskorn (2010) mais dans notre cas il s'agit des critères d'optimisation bien spécifiques car nous devons tenir compte de la planification initiale. Ainsi les critères considérés concerneront le makespan final, mais aussi la proximité du planning obtenu après la replanification avec le planning initial. Plus les 2 plannings sont proches, moins de perturbations dans l'organisation du système de production et son systèmes logistique sont introduites.

Comme précisé dans la section 1, le contexte considéré présente une forte composante humaine et sociale, avec la nécessité de tenir compte des savoir-faire des opérateurs et de leurs affinités sociales. Les travaux de Bhadury et al. (2000) ont mis en avant les bénéfices que peut apporter le regroupement en familles (ou équipes) des opérateurs. L'intégration des compétences des opérateurs au problème de planification a été notamment étudiée par Valls et al. (2009) qui ont développé un algorithme génétique pour résoudre un problème de type MSPSP (Multi-Skilled Project Scheduling Problem).

La prise en compte des zones de travail peut être retrouvée dans les travaux de Gharbi et al. (1999) qui gèrent cet aspect dans le cadre d'un projet de réparation. Dans leur cas, il s'agit d'un projet lié à des opérations réalisées par des machines, sans intervention manuelle, alors que dans

notre cas, nous dévons gérer les personnes effectuant des tâches sur des zones de travail qui représentent une ressource disjonctive.

L'association de tous ces aspects décrits ci-dessus résulte en un problème d'ordonnancement bien spécifique nécessitant une modélisation adaptée. En tenant compte de la contrainte temporelle pour la recherche d'une bonne solution, nous avons choisi le formalisme de la programmation par contraintes pour modéliser ce nouveau problème d'optimisation et le résoudre. Ce modèle est présenté dans la section suivante.

3 MODELE PPC

La PPC est une méthodologie très efficace pour la résolution des problèmes d'ordonnancement même pour des instances de taille importante. Avant de présenter le modèle construit, nous expliquons la notion des « tuples ». Ces objets peuvent être apparentés à des *n*-uplet, avec n un entier représentant le nombre d'éléments de ce *n*-uplet. Ainsi, utilisés pour définir certains éléments (notamment les tâches et les opérateurs), ces *n*-uplet permettent une meilleure gestion des informations. Afin d'accéder aux éléments de ces *n*-uplet, il est possible d'utiliser le point de ponctuation suivi du nom de l'élément à récupérer comme sur l'exemple ci-dessous :

$$uplet.élément$$

3.1 Variables

Les variables de décision de notre modèle seront pour la plupart des intervalles. Les intervalles définissent une période durant laquelle un évènement se déroule. Il est ainsi caractérisé par une date de départ, de fin, une intensité et une durée. Ses dates de début et de fin sont inconnues et seront déterminées durant la résolution du modèle. Sa durée est déterminée à l'avance (dans notre cas, la durée de chaque intervalle correspondra à la durée de la tâche associée). L'intensité est par défaut de 100%, ce qui sera considéré dans notre modélisation.

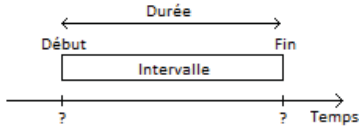


Figure 1 – Variable de type intervalle

Enfin, un intervalle peut être optionnel. Cela veut dire que celui-ci ne sera pas obligatoirement pris en compte dans le calcul de la solution (ni dans les contraintes). Ce sera ainsi au programme de déterminer quels intervalles optionnels seront actifs, et ceux qui seront inactifs. Voici les variables qui seront utilisées :

- $intvl_i$: intervalle sur lequel i est actif (i ∈ I).
- $x_{i,k}$: intervalle optionnel sur lequel l'opérateur k effectue la tâche i. Sa taille est égale à la durée de i et est restreinte par le calendrier de l'opérateur k (i ∈ I, k ∈ H).

Cet intervalle est donc optionnel pour dire qu'il y a plusieurs possibilités pour chaque couple $< tâche; opérateur >$ et que chaque intervalle défini comme « actif » représentera l'affectation réalisée dans la solution.
En plus de ces intervalles, nous utiliserons également une fonction d'état :

- is_usable_a : fonction d'état qui nous permet de contrôler l'utilisation de la zone a (a ∈ A).

Celle-ci prendra la valeur 0 sur les intervalles où la zone a n'est pas utilisée et 1 sur ceux où elle l'est.

3.2 Fonction objectif

La fonction objectif est composée de plusieurs expressions pour les différents critères que nous allons chercher à optimiser :

$$\max_{i \in I, k \in H} endof(x_{i,k}) \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} |endof(intvl_i) - old_end_i| \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I, k \in H} presenceof(x_{i,k}) * old_x_{i,k} \quad (3)$$

Le critère (1) représente le makespan de la solution. Le critère (2) mesure les décalages des dates de fin de chaque tâche. Le critère (3) mesure le nombre de couples <tâche ; opérateur> qui seront conservés d'une solution à l'autre.

Grâce à ces expressions, on peut donc définir un critère multi-objectif pour évaluer la solution :

$$\min \text{staticLex}((1),(2),(3)) \quad (4)$$

La fonction « staticLex » est utilisée pour de l'optimisation multi objectifs. Grâce à celle-ci il est possible de donner la priorité à certains critères. Dans le cas considéré par la fonction (4), l'ordre d'optimisation est : makespan (1), décalages dates de départ des tâches (2), changements d'affectations (3). Si nous désirons changer les priorités, il suffit d'interchanger les positions (pour mettre (3) à la place de (1) par exemple, faisant ainsi passer le critère de makespan en dernier en termes de priorité). En termes d'objectif, cela signifie que notre fonction va améliorer en premier le critère (1) jusqu'à atteindre l'optimum. Ensuite elle va passer au critère (2) pour finir par le (3). Cela signifie qu'on ne pourra pas avoir la valeur optimale pour le critère (3) si (2) n'est lui aussi pas à l'optimum. Interchanger l'ordre des critères permet donc d'explorer de nouvelles solutions et d'attaquer le problème sous un angle différent.

3.3 Contraintes

Voici les ensembles utilisés dans la définition des contraints :

I	ensemble des tâches ;
E	ensemble des couples de précédence ;
H	ensemble des ressources humaines ;
M	ensemble des ressources matérielles ;
P	ensemble des métiers ;
A	ensemble des zones ;

D ensemble des tâches déjà démarrées/terminées ;
F ensemble des tâches à réaffecter.

Respect des contraintes de précédence :
$\forall (i, j) \in E$ (5)
$$\text{endBeforeStart}(\text{intvl}_i, \text{intvl}_j)$$

Respect de la limite des ressources matérielles :
$\forall k \in M$ (6)
$$\sum_{i \in I} \text{pulse}(\text{intvl}_i, i.\text{m_needed}_k) \leq \text{capacity}_k$$
La fonction $\text{pulse}(\text{interval}, \text{quantity})$ est utilisée pour caractériser l'utilisation d'une ressource (ici k) et représente la contribution d'un intervalle à cette ressource sur le laps de temps où il est défini actif.

Respect de la limite du nombre d'opérateurs pour chaque métier :
$\forall p \in P, \forall k \in H \text{ si } p = k.\text{métier}$ (7)
$$\sum_{i \in I} \text{pulse}(x_{i,k}, i.\text{w_needed}_p) \leq \text{workers}_p$$

Double contrainte pour indiquer que chaque opérateur ne doit réaliser qu'une tâche à la fois :
$\forall p \in P, \forall k \in H \text{ si } p = k.\text{métier}$ (8)
$$noOverlap(x_{i,k} : \forall i \in I \text{ si } i.\text{w_needed}_p > 0)$$
La contrainte $noOverlap(\{b_1, \dots, b_n\})$ stipule qu'un seul intervalle de l'ensemble $\{b_1, \dots, b_n\}$ peut être actif au même moment.

$\forall i \in I, \forall p \in P \text{ si } i.\text{w_needed}_p > 0$ (9)
$$alternative(intvl_i, x_{i,k} : \forall k \in H \text{ si } k.\text{prof} = p, i.\text{w_needed}_p)$$
La fonction $alternative(intvl, \{b_1, \dots, b_n\}, n)$ indique que si l'intervalle $intvl$ est actif alors il doit y avoir exactement n intervalles de l'ensemble $\{b_1, \dots, b_n\}$ actifs, et que ceux-ci doivent être synchronisés avec $intvl$.

Aucun opérateur ne doit être affecté à une tâche dont il ne maitrise pas le métier requis :
$\forall i \in I, \forall k \in H \text{ si } i.\text{w_needed}_{k.\text{métier}} = 0$ (10)
$$!\,presenceOf(x_{i,k})$$
La fonction $presenceOf(intvl)$ force l'intervalle « $intvl$ » à être présent dans la solution. Cette contrainte force donc tous les intervalles $x_{i,k}$ concernés à ne pas être actifs.

Duo de contraintes pour n'autoriser l'affectation de tâches qu'à des dates où l'opérateur est disponible :
$\forall i \in I, \forall k \in H$ (11)
$$forbidStart(x_{i,k}, Calendar_k)$$
$$forbidEnd(x_{i,k}, Calendar_k)$$
$Calendar_k$ est une fonction qui représente l'activité de l'opérateur k au cours du temps. Elle prend la valeur 100 lorsque l'opérateur est à 100% d'efficacité (et qu'il travaille) et 0 lorsqu'il est en pause et ne travaille pas. La fonction $forbidStart$ empêche ainsi tout intervalle $x_{i,k}$ de démarrer lorsque $Calendar_k$ prend la valeur 0. De la même manière, $forbidEnd$ empêche les intervalles de finir dans ces laps de temps. Si l'intervalle $x_{i,k}$ devait se finir sur un laps de temps où $Calendar_k$ vaut 0, l'intervalle sera prolongé d'autant d'unités de temps d'absence de l'opérateur en charge.

Le prochain duo de contraintes assure qu'aucune tâche ne peut s'effectuer dans une zone exclue :
$\forall i \in I, \forall a \in i.\text{uses}$ (12)
$$alwaysEqual(is_usable_a, intvl_i, 1)$$
La contrainte $alwaysEqual(statef, intvl, n)$ stipule que la fonction d'état $statef$ doit toujours être égale à n sur l'intervalle $intvl$. Dans notre cas, cela signifie que la fonction is_usable_a doit valoir 1 sur l'intervalle $intvl_i$, et ceci pour chaque zone présente dans $i.uses$ qui représente l'ensemble des zones utilisées par i.

$\forall i \in I, \forall b \in i.\text{excludes}$ (13)
$$alwaysNoState(is_usable_b, intvl_i)$$
Le fonctionnement de $alwaysNoState(statef, intvl)$ est similaire à la contrainte (11) à l'exception que cette fonction force $statef$ à 0 sur l'intervalle $intvl$. Cela permet ainsi de forcer chaque fonction d'état is_usable_b liée à la zone b soit égale à 0 lorsqu'une zone est exclue par i.

Chaque zone doit se voir affecter au plus une seule tâche à chaque instant :
$\forall a \in A$ (14)
$$\sum_{i \in I \text{ si } a \in i.\text{uses}} \text{pulse}(\text{intvl}_i, 1) \leq 1$$

Enfin, les deux dernières contraintes ont été mises en place pour la replanification seulement, alors que toutes les contraintes précédentes peuvent être utilisées dans un modèle de planification initiale. La replanification sera lancée comme si elle cherchait à replanifier toutes les tâches, mais celles qui sont déjà réalisées seront forcées à la date à laquelle elles ont été démarrées.

Chaque tâche déjà terminée/commencée au moment de la replanification ne pourra être modifiée :
$\forall i \in D$ (15)
$$\text{startOf}(x_{i,i.\text{worker}}) = i.\text{date}$$
Ici, $i.\text{worker}$ représente l'opérateur affecté à la tâche dans l'ordonnancement précédent et $i.\text{date}$ représente l'ancienne date de démarrage.

On force le démarrage des autres tâches après la date de lancement du nouvel ordonnancement (cela permet de contrôler la date à laquelle nous voulons démarrer) :
$\forall i \in F$ (16)
$$\text{startOf}(x_{i,i.\text{worker}}) \geq \text{actual_date}$$

Ainsi, avec l'ensemble de ces contraintes, notre modèle peut être utilisé à la fois pour replanifier que pour générer la planification initiale (en enlevant les contraintes (15) et (16)). L'objectif de cette étude est de tester ce modèle

pour comparer les solutions générées dans différents cas que nous allons définir dans la section suivante.

4 RESULTATS EXPERIMENTAUX

4.1 Instances industrielles

Pour analyser les performances de notre modèle, nous avons utilisé un ensemble d'instances fournies par notre partenaire industriel du secteur aéronautique. Cet ensemble contient dix instances de 50 tâches et dix instances de 100 tâches.

Chaque instance possède entre onze et dix-neuf opérateurs pour un total d'un à quatre métiers. Nous détaillons dans les tableaux 1 et 2 les informations de chaque instance, dont les intitulés des colonnes sont tels quels :

- ID : identifiant de l'instance ;
- Z : nombre de zones ;
- M : nombre de machines ;
- P : ensemble des métiers (codés par chiffres);
- O : nombre d'opérateurs par métier (respectivement à P) ;
- S : nombre de zones avec plus d'un successeur.

ID	Z	M	P	O	S
50_1	106	0	1, 2, 3	11, 3, 4	6
50_2	111	0	1, 2, 3, 4	11, 3, 4, 1	5
50_3	57	1	1, 2	11, 4	3
50_4	62	0	1, 2	11, 4	3
50_5	110	1	1	11	9
50_6	187	0	1, 2	11, 4	7
50_7	217	1	1, 2	11, 4	8
50_8	170	0	1, 2, 3	11, 3, 4	6
50_9	48	0	1, 2	11, 4	5
50_10	57	1	1, 2	11, 4	3

Tableau 1 – Paramètres des instances de 50 tâches

ID	Z	M	P	O	S
100_1	409	3	A, C	11, 4	19
100_2	252	0	A, T, C, U	11, 3, 4, 1	12
100_3	193	0	A, T, C, U	11, 3, 4, 1	14
100_4	207	0	A, T, C, U	11, 3, 4, 1	18
100_5	179	1	A, C	11, 4	9
100_6	89	0	A, C	11, 4	9
100_7	191	1	A, T, C	11, 3, 4	8
100_8	207	0	A, T, C, U	11, 3, 4, 1	23
100_9	181	1	A, C	11, 4	7
100_10	79	1	A, C	11, 4	7

Tableau 2 – Paramètres des instances de 100 tâches

4.2 Protocole de tests

Tout d'abord nous avons résolu les 20 instances décrites avec notre modèle PPC pour obtenir le planning initial. Pour y parvenir, nous avons utilisé notre modèle de PPC en supprimant les contraintes (14) et (15).

Pour simuler un aléa, nous avons procédé de la manière suivante. Deux types d'aléas sont considérés indépendamment :

- Une tâche est décalée ;
- Un opérateur est absent sur un créneau donné de son calendrier habituel.

Pour simuler le décalage d'une tâche, nous sélectionnons une tâche de façon aléatoire. Ensuite, nous regardons les dates de départ des tâches avant interruption et regardons celle qui aurait dû être la suivante à démarrer en fonction de la date à laquelle nous nous trouvons. Nous décidons ensuite d'imposer sa date de départ comme suit :

$$new_date \geq old_date + 1h$$

Ainsi, cela revient à simuler une tâche qui démarre en retard et de voir son impact sur le planning.
Pour l'absence d'un opérateur, nous sélectionnons celui qui est le plus proche de terminer sa tâche pour ensuite forcer son arrêt jusqu'à la fin de la journée. Si c'est une tâche nécessitant plusieurs personnes, nous en sélectionnons une au hasard. Pour simuler cet aléa, nous rajoutons une période de non-travail dans le calendrier de l'opérateur sur le restant de la journée, ce qui permet de simuler un arrêt maladie. Nous considérons également que la durée de son arrêt ne dépasse pas la reste de la journée car l'entreprise aura la possibilité de faire venir quelqu'un pour le remplacer d'ici la journée suivante. Nous considérons que la tâche sur laquelle il travaillait se termine grâce à des équipe d'intervention, mais qu'il est par conséquent nécessaire de replanifier sa charge du travail restante.

Comme indiqué ci-dessus, nous testons différents critères d'optimisation en leur affectant une priorité différente. Le fait d'interchanger ces critères dans la fonction (4) résulte en six fonctions objectif différentes :

- staticLex(makespan, workers, decalages) (i)
- staticLex(makespan, decalages, workers) (ii)
- staticLex(workers, makespan, decalages) (iii)
- staticLex(workers, decalages, makespan) (iv)
- staticLex(decalages, workers, makespan) (v)
- staticLex(decalages, makespan, workers) (vi)

Nous espérons ainsi dégager dans un premier temps les critères qui sont les plus robustes en termes d'ordonnancement mais également la fonction qui offre les meilleurs compromis en termes d'optimalité pour chaque critère par rapport aux deux autres.

Enfin, pour se rapprocher au maximum des conditions de l'ordonnancement réactif, nous imposons au solver une limite de dix minutes pour le temps de calcul. Comme dit auparavant, il est primordial de trouver une solution rapidement, par conséquent étendre les temps de calcul n'aurait aucun sens dans notre cas.

4.3 Discussion des résultats

Les tests ont été effectués avec IBM ILOG CPO 12.10 avec un ordinateur possédant un processeur Intel Core i7-8665U (4 cœurs 1.90GHz) et 16Go de mémoire.

Le premier élément que nous analysons est la capacité des fonctions objectif à trouver les meilleures valeurs pour chaque critère. Nous présentons une synthèse de cette analyse dans les tableaux 2 et 3. Le tableau 2 présente les résultats pour les instances où l'aléa est lié à l'absence d'un opérateur et le tableau 3 présente les résultats pour les instances où l'aléa est lié au décalage d'une tâche.

Dans les tableaux 2 et 3, les colonnes représentent les fonctions objectif utilisées comme introduit ci-dessus et les lignes présentent les résultats obtenus pour les critères suivants : le nombre d'affectations tâche-opérateur inchangées (A), le makespan (M) et le décalage cumulé des fins des tâches (D), « t » représente le temps de résolution. Le préfixe 50 indique que le résultat a été obtenu sur les instances de 50 tâches et le préfixe 100 indique que le résultat a été obtenu pour les instances de 100 tâches. Les valeurs des tableaux 2 et 3 indiquent le nombre de fois que la fonction objectif (colonne) a fourni le meilleur résultat pour le critère indiqué par la ligne. Prenons un exemple dans le tableau 2 qui présente les résultats pour les instances où la source de l'aléa est liée à l'absence d'un opérateur. Nous pouvons voir dans ce tableau que la fonction objectif (vi) qui utilise l'ordre des 3 critères considérés de la manière suivante : $\mathrm{staticLex}(\mathrm{decalages}, \mathrm{makespan}, \mathrm{workers})$ a fourni 3 fois la meilleur valeur pour le critère « le nombre d'affectations tâche-opérateur inchangées » (A) pour les instances de 50 tâches et 4 fois pour le même critère pour les instances de 100 tâches.

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)
50_A	3	2	10	10	3	3
50_M	10	10	3	3	8	8
50_D	5	8	3	3	9	10
50_t	0	1	4	5	0	0
100_A	4	3	10	10	4	4
100_M	9	9	3	4	7	7
100_D	4	6	4	4	10	10
100_t	2	1	2	3	1	1

Tableau 2 - Occurrences des meilleures valeurs dans le cas de l'absence d'un opérateur

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)
50_A	5	4	10	10	4	4
50_M	10	10	4	4	7	7
50_D	3	6	2	3	9	9
50_t	0	1	0	9	0	0
100_A	5	4	10	10	5	5
100_M	10	10	4	5	9	9
100_D	3	8	3	5	10	10
100_t	0	0	2	8	0	0

Tableau 3 - Occurrences des meilleures valeurs dans le cas d'une tâche reportée

Une première propriété de ces fonctions mise en avant dans les résultats est la corrélation présente entre l'optimisation du makespan et des décalages de la date de fin des tâches. Lorsqu'on regarde les lignes associées à 50_M, 50_D, 100_M et 100_D et qu'on les compare aux lignes 50_A et 100_A, il semblerait que l'amélioration d'un de ces deux critères implique l'amélioration du deuxième (la meilleure valeur est trouvée assez souvent dans ces cas). En revanche, ces deux critères vont impacter négativement les affectations qui vont peiner à atteindre la meilleure solution possible. Cela voudrait donc dire que chercher à avoir le meilleur makespan possible, ou limiter au maximum les décalages, irait à l'encontre de la conservation des plannings pour les opérateurs.
Cependant, chercher à replanifier selon les opérateurs et leurs affectations n'est pas une mauvaise solution pour autant. Lorsqu'on met en lien les lignes 50_A et 100_A avec les lignes 50_t et 100_t, nous pouvons observer que les meilleurs temps sont dans 75% des cas ceux des fonctions ayant pour l'objectif premier les affectations. Dans le cas des reports d'une tâche, cela semble même être la méthode la plus rapide avec 100% des meilleurs temps (dont 80% pour la fonction (iv)). Nous pouvons tirer plusieurs informations de ces résultats :

1. Premièrement, les fonctions qui se basent sur les affectations et les opérateurs en premier critère se résoudront plus rapidement, permettant d'obtenir un planning dans un délai plus court.

2. Et deuxièmement, le critère basé sur la sauvegarde des affectations tâches-opérateurs semble être le meilleur dans les cas des aléas liés aux tâches décalées. Chercher à optimiser en suivant ce critère semble donc être la meilleure décision.

Pour approfondir ces résultats, nous avons calculé dans les tableaux 4 et 5 la proximité avec la meilleure solution dans le pire des cas pour chaque fonction et chaque instance. Si on prend la fonction (i) pour les instances de 50 tâches du tableau 5, cela veut dire qu'au pire, la valeur trouvée est équivalente à 1,05 fois la meilleure solution, soit à 5% de celle-ci. Ensuite les figures 2-7 présentent respectivement :

- Figure 2 – la répartition des valeurs du critère d'affectation lors de l'absence d'un opérateur pour les instances de 100 tâches,
- Figure 3 – la répartition des valeurs du critère du makespan pour les instances de 50 tâches lors de l'absence d'un opérateur,
- Figure 4 – la répartition des valeurs du critère de déviation dans les instances de 100 tâches lors de l'absence d'un opérateur,

- Figure 5 – la répartition des valeurs du critère de déviation dans les instances de 50 tâches lors de l'absence d'un opérateur,
- Figure 6 – la répartition des temps de calcul pour les instances de 100 tâches lors d'un report de tâche,
- Figure 7 – la répartition des temps de calcul pour les instances de 100 tâches lors de l'absence d'un opérateur.

L'objectif à travers ces figures est maintenant de présenter les cas particuliers qui se sont présentés à nous et ce qu'ils semblent signifier pour la résolution du problème.

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)
50_A	0,05	0,06	0,00	0,00	0,04	0,04
50_M	0,00	0,00	0,27	0,27	0,04	0,04
50_D	0,98	0,67	2,14	2,14	0,00	0,00
50_t	820,06	8,88	6,26	0,77	7,06	8,77
100_A	0,11	0,29	0,00	0,00	0,18	0,18
100_M	0,92	0,92	0,92	0,30	0,92	0,92
100_D	245,17	2,53	3207,83	3207,83	0,00	0,00
100_t	38,34	61,15	38,32	81,17	14,63	116,16

Tableau 4 - Proximité avec les meilleures solutions dans le cas de l'absence d'un opérateur

	(i)	(ii)	(iii)	(iv)	(v)	(vi)
50_A	0,12	0,12	0,00	0,00	0,10	0,10
50_M	0,00	0,00	0,31	0,30	0,01	0,01
50_D	10,00	1,04	428,71	21,06	0,00	0,00
50_t	27,25	11,65	4,56	1,32	9,83	9,36
100_A	0,04	0,05	0,00	0,00	0,05	0,05
100_M	0,00	0,00	0,07	0,07	0,01	0,01
100_D	28,55	8,57	80,43	3,16	0,00	0,00
100_t	177,09	139,24	120,51	3,66	105,09	105,12

Tableau 5 - Proximité avec les meilleures solutions dans le cas d'une tâche reportée

Le premier constat que nous pouvons faire en analysant les résultats de ces tableaux concerne la robustesse du critère d'affectation. En comparant les lignes 50_A et 100_A des deux tableaux, nous observons qu'au pire des cas, la valeur de la déviation maximale est à 12% pour les instances à 50 tâches et à 29% pour les instances à 100 tâches.

Or si l'on se penche sur la figure 2, nous pouvons voir que la répartition reste cependant très centrée malgré la présence de ces valeurs extrêmes. Cela semble donc indiquer que ces valeurs supérieures restent peu fréquentes comparées à l'ensemble des instances. La majorité de ces valeurs se situent en dessous de la valeur médiane car les affectations est un critère que nous cherchons à maximiser pour conserver au maximum les plannings de chaque opérateur.

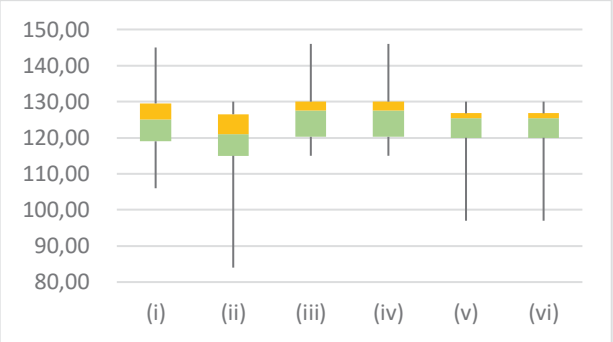


Figure 2 - Répartition des valeurs du critère d'affectation lors de l'absence d'un opérateur pour les instances de 100 tâches.

Nous pouvons donc estimer que le critère des affectations est un critère qui donnera des valeurs dans un espace plus restreint, permettant une robustesse dans l'élaboration des plannings, sans exclure pour autant la possibilité d'aboutir à des valeurs extrêmes dans les cas des plannings très perturbés par la replanification. Cela se vérifie d'ailleurs dans les autres cas où la répartition est similaire aux résultats des fonctions (iii) et (iv) de la figure 2.

Pour le critère du makespan dans les cas des 100 tâches, la répartition est également très centrée autour de la médiane, avec quelques valeurs extrêmes. Or, pour les instances de 50 tâches, les valeurs sont beaucoup plus réparties comme le montre la figure 3. Avec cette plus grande répartition survient une diminution des valeurs extrêmes, et une grande majorité se trouve cette fois-ci au-dessus de la valeur médiane, car nous cherchons ici à minimiser notre critère et donc s'éloigner de ce minimum revient à augmenter la valeur calculée.

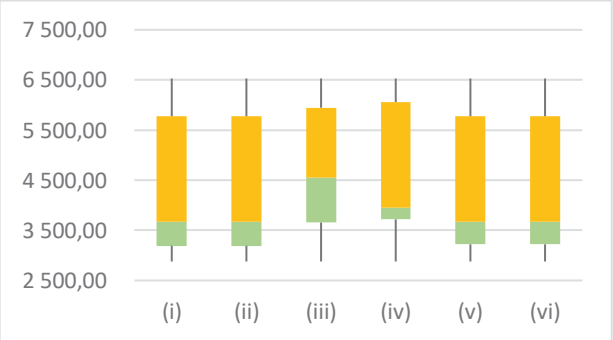


Figure 3 - Répartition des valeurs du critère du makespan lors de l'absence d'un opérateur pour les instances de 50 tâches.

Le makespan est donc un objectif qui trouvera ses valeurs dans un plus grand espace de solution, mais dont les valeurs extrêmes seront peu éloignées de ces espaces. Par conséquent, de nombreuses solutions fournirons la valeur du makespan relativement proche.

Le cas des déviations est celui où nous avons trouvé les valeurs les plus extrêmes (notamment dans le cas 100_D du tableau 4). Nous avons mis en forme ces données dans la figure 4.

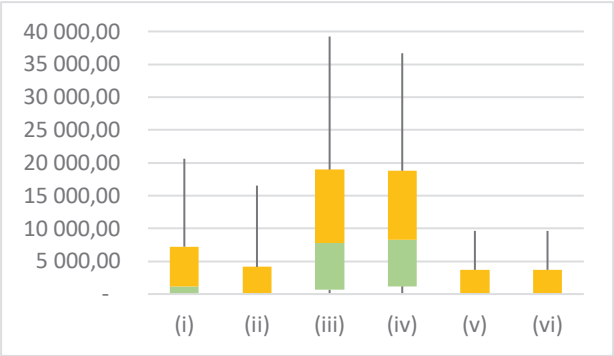


Figure 4 - Répartition des valeurs du critère de déviation pour lors de l'absence d'un opérateur pour les instances de 100 tâches.

Fort est de constater que la répartition est la plus forte pour les fonctions (iii) et (iv), fonctions qui privilégient les affectations. Nous en avions parlé en analysant les premiers tableaux, et cette figure semble le confirmer, mais prendre des décisions en se basant sur la conservation des anciens plannings va fortement impacter les déviations, et même plus fortement que le makespan en lui-même. Cela montre aussi que le makespan et les déviations semblent être caractérisés par une faible présence des valeurs en dessous de la médiane (portion verte) pour les fonctions (i) et (ii). Cela veut dire qu'une grande partie des valeurs de déviation sont optimales dans ces cas-là également. La figure 5 montre que c'est également le cas pour les instances de 50 tâches, et nous affirmons que ces résultats se vérifient aussi dans le cadre d'un aléa de tâche reportée.

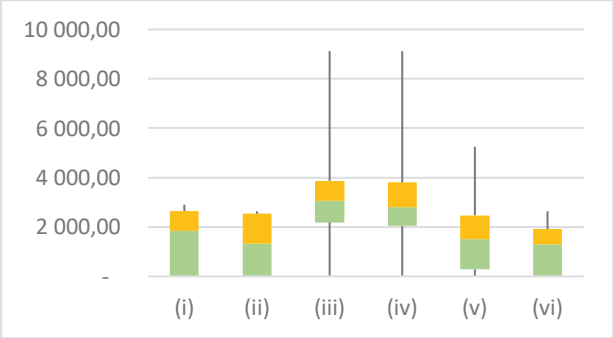


Figure 5 - Répartition des valeurs du critère de déviation dans lors de l'absence d'un opérateur les instances de 50 tâches.

Le constat est moins fort que lorsqu'il y a 100 tâches, mais conserve cependant la même tendance. Cela veut dire que pour obtenir une bonne valeur pour le critère de déviation, il est préférable de se focaliser sur le makespan ou les déviations elles-mêmes. Dans le cas contraire, la solution sera très peu robuste sans être très mauvaise forcément. Etant donné qu'il ne s'agit ici que de décalages, l'échange de deux tâches très éloignées l'une de l'autre va provoquer une très forte dégradation du critère de décalage, alors que les objectifs en termes de makespan et d'affectation pourraient être fortement améliorés grâce à cette opération. Il faut par conséquent rester vigilant quant à l'interprétation de ce critère.

Le dernier critère qu'il nous reste à analyser est celui du temps. Nous allons ici nous pencher sur les instances de 100 tâches car celles-ci auront une amplitude potentiellement plus grande de par leur complexité.

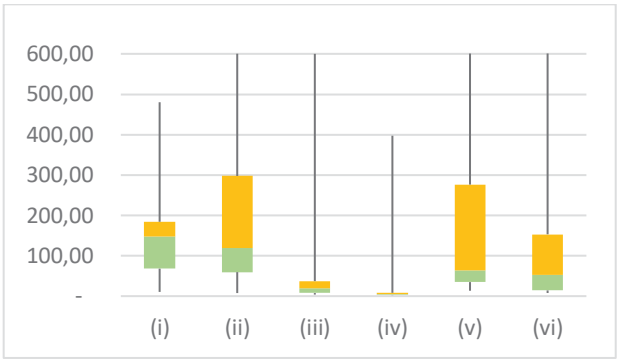


Figure 6 - Répartition des temps de calcul dans les instances de 100 tâches lors d'un report de tâche.

Il faut savoir que les données concernant les temps de calcul sont les plus hétérogènes. Cependant, nous avons pu voir qu'un critère semblait ressortir de toutes ces courbes. Si l'on se penche sur la figure 6, il est possible de voir que malgré les valeurs extrêmes, les fonctions (iii) et (iv) sont celles qui semblent les plus centrées autour d'une même valeur. Cet écrasement autour d'une valeur faible nous permet d'émettre l'hypothèse que ces fonctions sont celles qui vont déterminer une solution le plus rapidement. Cette conjecture semble se vérifier avec les informations des autres instances et dont les courbes ont une allure générale similaire.

Nous pouvons également voir que plusieurs instances ont atteint la date limite de dix minutes qui, nous le rappelons, était un critère d'arrêt lors des calculs. Ces temps extrêmes ne sont cependant pas présents dans les instances de 50 tâches et la répartition est très similaire par rapport aux médianes. La conjecture que nous pouvons faire grâce à ces résultats est que prioriser les affectations amène à les conserver, et donc décaler les tâches ce qui ressemble au comportement du « right shift scheduling », méthode mentionnée dans les travaux de Chaari et al. (2014) dont nous avons parlé dans notre étude de la littérature.

Pour finir, voici dans la figure 7 un cas extrême que nous avons pu rencontrer.

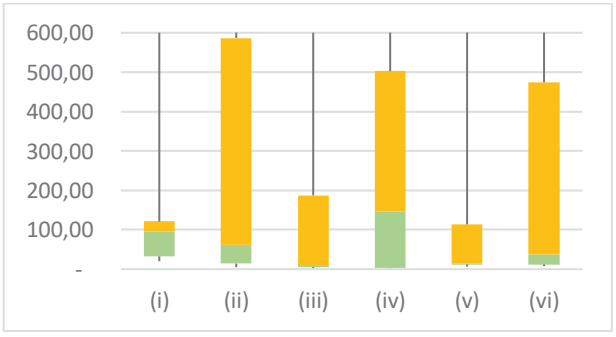


Figure 7- Répartition des temps de calcul dans les instances de 100 tâches lors de l'absence d'un opérateur.

Nous constatons que pour chaque critère, la résolution d'au moins une instance a atteint le critère d'arrêt de dix minutes. Nous n'avons cependant pas encore d'explications suite à ces résultats et des travaux futurs pourrons potentiellement porter sur l'étude des paramètres qui influencent la complexité de chaque instance.

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons étudié la problématique de gestion d'aléas dans le contexte d'une chaine d'assemblage aéronautique. En particulier, nous nous sommes intéressés au développement d'une méthode réactive permettant de replanifier un ordonnancement de production devenu irréalisable après un aléa de type de décalage d'une tâche suite au retard de l'approvisionnement ou l'absence d'un opérateur sur un créneau de travail. gérer l'incertitude dans les projets d'ordonnancement. Dans cette situation, l'objectif est donc de générer un nouveau planning le plus rapidement possible afin de ne pas retarder la finalisation de l'assemblage : c'est la replanification réactive, car elle se trouve en aval de l'aléa.

Nous avons donc eu pour objectif de tester différents critères de replanification. Le premier est la minimisation du makespan. Le second vise à conserver au maximum le planning des opérateurs : on parle de maximisation des affectations. Le troisième concerne les dates de fin des tâches : on cherche à faire en sorte que celles-ci soient identiques au maximum à celles dans l'ordonnancement avant perturbation. Ces trois critères furent ainsi associés dans une fonction multi-objectifs, et leur priorité a été modifiée afin de voir l'impact qu'ont ces variations sur la replanification.

Nous avons mis en place un modèle de PPC afin de tester ces différentes fonctions. Pour réaliser ces tests, nous avons utilisé des instances fournies par les entreprises partenaires de notre projet. En utilisant notre modèle PPC réduit, nous avons généré des plannings initiaux, puis un aléa. Cet aléa pouvait prendre deux formes : une tâche étant infaisable à la date à laquelle elle était prévue auparavant par exemple à cause d'un retard d'approvisionnement, et doit donc être retardée ; ou un opérateur ne peut assurer son planning jusqu'à la fin de la journée en ne pouvant plus travailler. Ces deux aléas seront appliqués à chaque instance générée, mais de manière séparée. Par conséquent, deux instances de replanification ont été générées pour chaque instance. Au total, nous avons testé donc quarante instances sur six fonctions multi-objectifs différentes.

Ces tests nous ont donc permis de montrer l'impact qu'ont les différentes priorités dans les fonctions multi-objectifs sur les critères énoncés auparavant. Nous avons vu que le critère d'affectations, s'il est prioritaire, nécessite un temps de calcul très court, mais semble s'apparenter à la méthode du right shift scheduling. D'un autre côté, les critères de makespan et de décalages semblent être liés entre eux et aller à l'encontre des affectations (un bon makespan impliquera de dissocier plus d'opérateurs de leurs tâches d'origine). Nous avons également vu que le critère d'affectations est relativement robuste, ce qui semble indiquer qu'il n'est pas le critère le plus prioritaire. Le mettre en deuxième position pour avoir le makespan ou les décalages en première semble former un excellent compromis entre la date de fin de l'assemblage, la conservation des plannings des opérateurs et le temps de calcul.

L'objectif est désormais de faire des tests sur des instances complètes afin de comparer nos résultats avec nos partenaires. Etudier l'impact qu'ont les différentes données des instances sur la complexité du problème peut également être piste pour mieux comprendre les observations faites dans la section 4. Enfin, une fois ces objectifs atteints, nous pourrons envisager l'implémentation du modèle de PPC dans un outil qui peut être utilisé par des industriels.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été financé par le projet ANR PER4MANCE. Nous remercions les entreprises partenaires du projet pour leur aide et collaboration.

REFERENCES

Bhadury J., Mighty E.J. et Damar H., 2012. Maximizing workforce diversity in project teams: a network flow approach. *Omega*, vol. 28, p. 143-153.

Chaari T., Chaabane S., Aissani N. et Trentesaux D., 2014. Scheduling under uncertainty: Survey and research directions. *2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport,* Hammamet, Tunisie.

Gharbi A., Pellerin R. et Villeneuve L., 1999. A new constraint-based approach for overhaul project scheduling with workspace constraints. *International journal of industrial engineering*.

Hartmann S. et Briskorn D., 2010. A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 207, n°1, p. 1-14.

Hazir Ö. et Ulusoy G., 2020. A classification and review of approaches and methods for modeling uncertainty in projects. *International Journal of Production Economics*, vol. 223.

Kuster J., Jannach D. et Friedrich G., 2008. Extending the RCPSP for modeling and solving disruption management problems. *Applied Intelligence*, vol. 31, n°3, p. 234-253.

Valls V., Pérez Á. et Quintanilla S., 2009. Skilled workforce scheduling in Service Centres. *European Journal of Operational Research*, vol. 193, p. 791-804.

Zhu G., Bard J. et Yu G., 2005. Disruption management for resource-constrained project scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 56, p. 365-381

STAKEHOLDERS' ANALYSIS IN LNG BUNKERING: AN INTEGRAL PART OF RISK MANAGEMENT PROCESS

Evangelos Bellos, George Chatzistelios, Angeliki Deligianni, Vrassidas Leopoulos

School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens,
Athens, Greece
vbel@central.ntua.gr, gchatzis@mail.ntua.gr, aggdelig@mail.ntua.gr, vleo@central.ntua.gr

ABSTRACT: The interest to use LNG as a maritime fuel is increasing significantly due to IMO's regulations. However, LNG's use as a shipping fuel faces important challenges, mainly due to the lack of infrastructure, facilities, and important uncertainties/challenges regarding the adoption by the shipping industry. Risk Management is an appropriate method to take into consideration uncertainty and support the relevant decisions. The current paper proposes a stakeholders' approach for managing risks, that includes a structured way for identifying and analyzing their interests, needs and expectations for the development of an LNG bunkering facility, and thus their potential influence on its objectives. The paper also presents the use of the Social Network Analysis (SNA) for assisting the modelling and analysis of stakeholders' interests, interactions, and activities to allow a justified evaluation of their power and their potential to create threats and opportunities for the implementation of the facility.

KEYWORDS: *Risk Management, Maritime systems, Maritime logistics, Environment, Stakeholders' analysis, Social Network Analysis (SNA)*

1 INTRODUCTION

In recent years, Liquefied Natural Gas (LNG) has been proposed as an alternative fuel in the transport sector since it is a more environmentally friendly solution than conventional fuels. Discussion about the use of LNG as a maritime fuel is increasing significantly mainly due to the introduction of stricter legislation by the International Maritime Organization (IMO) and European Commission (e.g. Directive 2012/33/EU) regarding the emissions of exhaust gases to environment from ships. In particular, the Agency claims that, on and after 1 January 2020, ship fuel should not contain more than 0.50% m/m (mass by mass) sulfur, against the current limit of 3.50%, which has been in effect since 1 January 2012 (IMO, 2016a; MEPC, 2008).

Although LNG has been considered as a preferable low emission solution (IMO, 2016b), data for 2012 regarding maritime fuels show that LNG consumption is still far behind Heavy Fuel Oil (HFO) and Marine Gas Oil (MGO) (Faber et al., 2016).

To consider LNG as an alternative marine fuel, a stable and efficient supply chain must be established in which several organizations (LNG Receiving vessels, LNG bunker vessels, bunker terminals, port authorities etc.) should collaborate. Each organization in this supply chain has its mission, vision, and objectives either in the same direction with the others or conflicting.

Important challenges in this supply chain are due to the lack of infrastructure and bunkering facilities, creating important uncertainties regarding the adoption of LNG by shipping industry.

Risk management is an appropriate management method to consider the effect of uncertainty for the establishment and operation of such a supply chain.

Risk should be considered in all phases of an LNG installation lifecycle and throughout the LNG supply chain and not only related to accidental events, but in general as a positive or negative deviations from the expected outcomes and desired results at strategic and operational level.

Each organization in the LNG supply chain should be able to develop a risk management framework, which clearly defines its external and internal environment and objectives. Moreover, it should be able to efficiently communicate and consult with all relevant interested parties (stakeholders) to achieve an in depth understanding of its business environment dynamics, opportunities, and threats. Crucial role among these organizations has the organization which will implement the LNG bunkering facility, especially the design phase.

The current paper includes an approach for systematic analysis of stakeholders, their needs, and expectations, as a part of a framework to manage risks related to the design of an LNG bunkering facility. The proposed approach utilizes the Social Network Analysis (SNA) methodology to model and analyze the stakeholders' interests, interactions and activities related to the organization's objectives.

2 LITERATURE REVIEW

2.1 Risk and Interested Parties

A significant number of bibliographic references, standards and technical specifications demonstrate that uncertainty is an important issue for LNG bunkering installations. However, research is mainly oriented towards the analysis of events (occurrence or change of a particular set of circumstances) that could have as consequences technical failure or accident, and therefore threats that could result in negative impact on human health and environment. The special focus given by the scientific community and engineers to this category of risk (i.e. technical failures and accidents) is reflected in the definition of the term "risk" for this industry. Indicatively:

- ELOT EN 1473:2016 defines risk as a "combination of the consequence and the frequency of a specific hazard occurring within a specified period under specified circumstances" (ISO, 2016)
- ISO/TS 16901 defines risk as a "combination of the probability of occurrence of harm and the severity of that harm" where harm is a physical injury or damage to the health of people or damage to property or the environment (ISO, 2015a)
- ISO/TC 8 ISO 20519 defines risk "…As a result, personnel involved in the transfer shall devise procedures to minimize the risks when a safety zone, or a monitoring and security area, in their provisions are violated". (ISO, 2017a)
- EMSA defines risk as a multiple of Hazard Consequence (expressed in terms of its negative impact) and Likelihood of its occurrence(European Maritime Safety Agency, 2017).

Risk management in LNG bunkering, is mainly implemented by event driven risk analysis methods for assessing the probability and the severity of consequences of accidental events. Popular risk analysis methods implemented in the field are:
-Qualitative methods such as Preliminary Risk Analysis, What-if Analysis, Hazard and Operability Analysis (HAZOP) etc.
- Semi-quantitative Risk Analysis such as Tree-based techniques; Fault Tree Analysis (FTA), Event Tree Analysis (ETA) Bow-tie method, Barrier-Systematic Cause Analysis Technique (BSCAT), Layers of Protection Analysis (LOPA) etc.
-Quantitative Risk Analysis (QRA) (Mokhatab et al., 2013).

However, if an organization participated in the LNG supply chain attempts to take into consideration uncertainties in the decision making, then the scope of risk management should be extended to cover also other important objectives, related for example, to the market share, supply chain stability, conformance to legislation, sustainability etc. This approach is in line with the ISO 31000 standard, which defines risk as "the effect of uncertainty on objectives" and highlights the importance of the continuous and systematic communication and consultation with interested parties/stakeholders in all steps of the risk management process.

Stakeholder or interested party constitutes one of the common terms and core definitions for ISO management system standards given in Annex SL of the Consolidated ISO Supplement to the ISO/IEC Directives, Part 1.

More specifically in ISO 31000 a stakeholder (or interested party) is defined as a "person or organization that can affect, be affected by, or perceive themselves to be affected by a decision or activity". The standard recommends that continuous and systematic communication and consultation with all stakeholders is a cornerstone at all steps of the risk management process, as decisions and reasons for taking action become clearer (ISO, 2018). Appropriate and timely involvement of stakeholders enables their knowledge, views and perceptions to be considered. This results in improved awareness and informed risk management. Therefore, to conduct risk management, the stakeholders must be analyzed at all steps of the risk management process, considering the set goals of the organization.

ISO 9000, shares the definition with ISO 31000 and stipulates that the relevant interested parties may cause significant risk to organizational sustainability if their needs and expectations are not met. (ISO, 2015b)

In the field of an organization's social responsibility, an interested party is defined in ISO 26000 as "individual or group that has an interest in any decision or activity of an organization". According to the standard a stakeholder has one or more interests that can be affected by the decisions and activities of an organization. This interest gives the party a "stake" in the organization that creates a relationship with the organization, which need not be formal or even acknowledged by the stakeholder or the organization (ISO, 2010).

ISO 21500 which provides guidance on project management states that for a project to be successful, the stakeholders must be described in detail, while the roles and responsibilities of the stakeholders must be defined and communicated based on the goals of the organization and the project (ISO, 2012a). ISO 21500 defines stakeholders as "a person, a group or an organization that has interests or may influence, be influenced or perceived to be affected from any aspect of the project".

In ISO 22313, which gives guidance and recommendations for applying the requirements of the business continuity management system (BCMS) given in ISO 22301, the interested party is defined differently than in the other standards. The concept of stakeholder is presented with a broader definition than other standards.

Clause 3.19 states that the party concerned is "a person or group of people who hold an opinion which may affect the organization" (ISO, 2012b).

2.2 Stakeholder's Analysis

Analysis of stakeholders is becoming increasingly popular in a wide range of organizations, in many different areas. Stakeholder analysis is an approach for generating knowledge and data regarding interested parties, by understanding their behavior, interests, needs and expectations (Varvasovszky & Brugha, 2000). Understanding those stakeholders from an organization's point of view leads to an assessment of the influence and resources they convey connected on decision-making or implementation method (Brugha & Varvasovszky, 2000; Varvasovszky & Brugha, 2000). In project management the aim of stakeholder analysis is to increase the chances of a successful decision making which leads to the projects' success. (Varvasovszky & Brugha, 2000)



Figure 1:Stakeholders Analysis Process

The stakeholder analysis process (Figure 1) includes the following steps:

- Identification of stakeholders; identifying who has a stake in aspects of the system under study, and who thinks he is affected (Brugha & Varvasovszky, 2000; Prell et al., 2009; Varvasovszky & Brugha, 2000).
- Stakeholders Categorization
- Investigating relationships and interactions between stakeholders (Reed et al., 2009).
- Collecting, recording and analysis information, in order to define interest, needs expectations, power (Prell et al., 2009; Varvasovszky & Brugha, 2000).
- Prioritization of stakeholders: Power and influence are analyzed and then stakeholders are evaluated according to their involvement in decisions about aspects of the system in relation with the objectives of the organization (Brugha & Varvasovszky, 2000; Prell et al., 2009; Varvasovszky & Brugha, 2000).
- Monitoring and review: Stakeholders analysis is a dynamic and recurring situation, due to the many data and relationships that are discovered during its conduct

Various tools have been developed to assist in the implementation of this process, such as analysis of the value chain and the related legislative framework market analysis, interviews with stakeholders, social media analysis etc. (ISO, 2017b). The Social Network Analysis is a popular method for the investigation of relationships between stakeholders as presented in paragraph 2.3 (Buckingham et al., 2018; Reed et al., 2009; Zedan & Miller, 2017).

2.3 Social Network Analysis (SNA)

Social Network Analysis is used to identify the role and influence of different stakeholders and categories of stakeholder and their relationships. Stakeholders are part of a social whole that is permeated by the most important element of a society, which is their relationship. These relationships determine the impact of the stakeholders on the achievement or not of the objectives of an organization or the implementation of a project.

Social Network Analysis (SNA) is based on the identification of relationships/interactions among the stakeholders. The basic elements of a social network are the "nodes" and the "links. "Nodes" represent the stakeholders under analysis, while "Links" represent the relations among the stakeholders (Buckingham et al., 2018; Hanneman & Riddle, 2005; Research to Action, 2012).

Following the identification of the stakeholders and the relationships among them, it is possible to calculate important indices to evaluate the role of each stakeholder in the network. Main indices of the method are:

- Density: which is calculated as the ratio of the sum of existing links by the number of possible links (Ding & Liu, 2011; Hanneman & Riddle, 2005).
- Degree: The degree of a node reflects the number of connections to other nodes. Degree is the sum of in-degree and out-degree, of each node. In-degree value, calculate how many connections enter the node, and Out-degree value, calculate how many connections come out of a node (Hanneman & Riddle, 2005).
- Closeness centrality: It is calculated by the sum of the lengths of all the shortest paths between all linked nodes (Ding & Liu, 2011; Hanneman & Riddle, 2005).
- Betweenness centrality: It reflects how often an interested party interrupts the shortest routes between two other interested parties (Ding & Liu, 2011; Hanneman & Riddle, 2005).
- Eigenvector: It reflects the indirect influence of a node in a network, according to the connectivity of its neighboring nodes (Hanneman & Riddle, 2005).
- Alliances-modularity: The modularity calculation allows the identification of stakeholders' communities and potential alliances (Ding & Liu, 2011).

3 METHODOLOGY

In this section, the Social Network Analysis Methodology is applied to describe and analyze the interactions between stakeholders during the design and construction phase of an LNG bunkering installation. LNG facilities are either onshore or offshore.

The proposed methodology presents an approach for systematic analysis of stakeholders, their needs, and expectations, as a part of a framework to manage risks. The systematic proposed approach utilizes tools and processes to model and analyze the stakeholders' interests, interactions and activities and thus serve the establishment of the risk management framework and process which extends ISO 31000 approach.

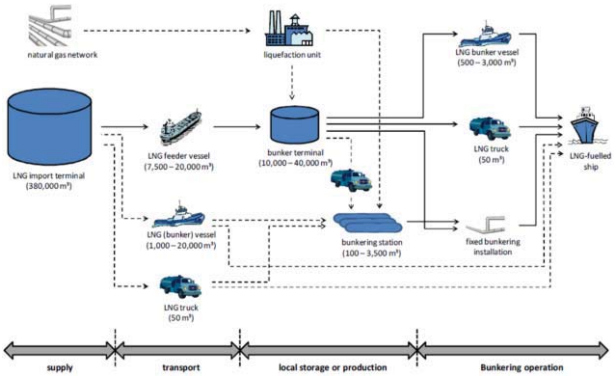


Figure 2:LNG supply chain

In Greece, Liquefied Natural Gas arrives from upstream suppliers and is temporarily stored at Revithoussa LNG import terminal which is operated by the Hellenic Gas Transmission System Operator, DESFA S.A. Ships' bunkering can be achieved through three possible alternative supply options which are: LNG bunker ships, LNG trucks or onshore installations. Onshore installations can be supplied either by LNG bunker ships or LNG trucks. Several National Ports are considering options for LNG ship bunkering. In the port of Patras an onshore installation is considered. For the port of Piraeus, a solution of banker vessels is examined. In other ports (e.g. port of Volos) a solution of LNG trucks seems more feasible.

Several organizations, both from public and private sector, are directly or indirectly involved in the design and operation of LNG bunkering facilities.

The proposed method identifies stakeholders and also analyses all possible interactions and relationships among them to better understand their interests, needs and expectations. The following types (Table 1) of interactions and relationships are examined:

R1. Stipulated by the legislation	R7. Alliance
R2. Customer requirements	R8.Cooperation
R3. Funding / financial flow	R9. Material flow
R4. Exercise of authority	R10. Competition
R5. Guidelines from standard	R11.Information exchange
R6. Exercise of influence or pressure	

Table 1: Types of stakeholders' interactions/ relationships

Such relationships are due to material (LNG) flow, information exchange, funding and financial flows, synergies, influence, and others. Many of these relationships are stipulated by the existing legal framework or the structure of the value chain.

All interactions involve decisions to be taken by the stakeholders. These decisions are taken under uncertainties which lead to threats and opportunities, with different levels of probability of realization and impact, that is, with different risk.

3.1 Stakeholders Identification

Based on the analysis of the legislative framework, the value chain and the national LNG market the following main stakeholders are involved in the design of an LNG bunkering facility (Table 2).

Banks	Citizens
Citizens' protest groups	Committee for determining the boundaries of the seashore
Competent authorities for environmental impact assessment	Competition Commission
Engineer	Environmental organizations
European Commission	Fire Service
General Chemical State Laboratory	General Secretariat for Civil Protection
General Secretariat of Ports, Port Policy and Maritime Investments	Government
Greek State	Hellenic Coast Guard
Hellenic Gas Operator	Investors
Labor Inspectorate	LNG Suppliers
Media	Ministry of Culture and Sports
Ministry of Development & Investments	Ministry of Environment and Energy
Ministry of Finance	Ministry of Health
Ministry of Infrastructure and Transport	Ministry of Labor and Social Affairs
Ministry of Maritime Affairs & Insular Policy	Ministry of National Defense
Ministry of Rural Development and Food	Ministry of Tourism
Municipality	Opposition Political Parties

Other Neighboring Facility	Prefecture
Port Authority	Port Design and Development Committee
Organization implementing the project	Regulatory Authority for Energy
Regulatory Authority for Ports	

Table 2: Main stakeholders involved in the design of an LNG bunkering facility

3.2 Development of stakeholders' network

During this step the Social Network was developed in which the stakeholders presented in Table 2, were depicted as "nodes" of the diagram while the identified relationships between them as "links".

For the determination of these relationships, a detailed analysis of the value chain and the relative legislative framework was performed. Moreover, an extensive research on social media and other online sources took place to facilitate the identification of existing informal relations among the interested parties.

The diagram was developed with the use of a specialized software tool, called Gephi-The Open Graph Viz Platform (*Gephi-The Open Graph Viz Platform*, n.d.). The tool allows the graphical representation of stakeholders and their interrelations using a network diagram of nodes and edges.

The diagram (Figure 3) presents the 42 identified stakeholders and a total of 302 relationships existing in the design phase of an LNG bunkering facility.

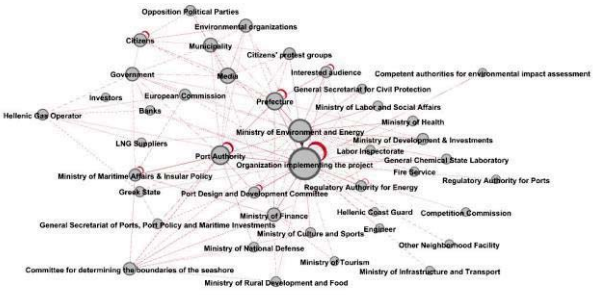


Figure 3:Social Network Graph

3.3 Network analysis results

In this paragraph the basic results of the Social Network analysis are presented.

Density: The density of the network is 0.096. This means that only 9.6% of all the potential connections between nodes are present. This low value of the network density indicates that the stakeholders act on a rather independent way and the interactions are mainly triggered by the legislation.

Average degree: The average degree of the network is 3.9. This means that a stakeholder interacts with others with 3.9 connections on average.

Node degree: As mentioned earlier, the degree of a node reflects the number of connections to other nodes. Figure 4 shows that the stakeholder with the most connections during the design phase is the Organization implementing the project, having 51 links to or from other entities. Other highly connected stakeholders are the Ministry of Environment and Energy (32 connections), the Port Authority (23 connections) and the Prefecture (20 connections). Other less connected stakeholders (10 – 20 connections) are the media, the municipality, the government, the Ministry of Finance, environmental organizations, the citizens, the commission for determining the boundaries of the seashore and the Ministry of Maritime Affairs & Insular Policy. In Figure 3 the size of the node of each stakeholder represents its degree.

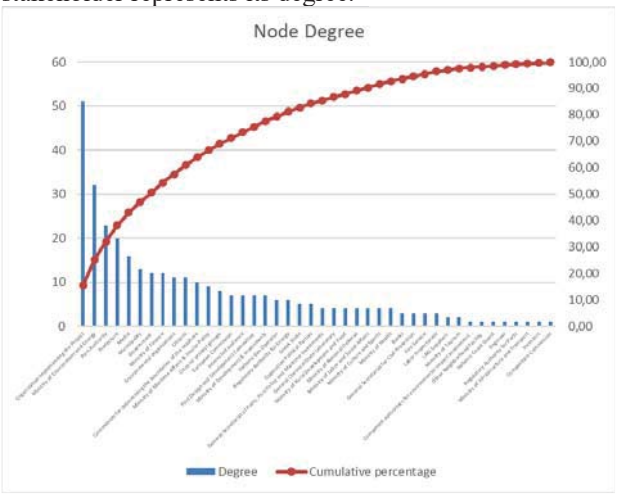


Figure 4:Node degree frequencies (pareto diagram)

Centrality: The Organization implementing the project has the greatest value of **closeness centrality** (73.58%) and he/she could be considered as the more influential stakeholder in the network during this phased along with the Ministry of Environment and Energy with 59.09%.

Similarly, the Organization implementing the project and the Ministry of Environment and Energy have also the greatest values of **betweenness centrality**, which are 814.6 and 257.6 respectively.

Finally, the **eigenvector centrality** values show that the Organization implementing the project and the Port Authority have greater independence in relation to the overall structure of the network.

Alliances – modularity. The analysis identifies four (4) communities in the network, which are groups of stakeholders that could potentially act coordinated to control or strengthen their position on the project. These communities are (see Figure 5):

- The construction related community (Group 1)
- Stakeholders associated with LNG (Group 2)
- Interested Parties associated with the local community (Group 3)
- The port-related community (Group 4)

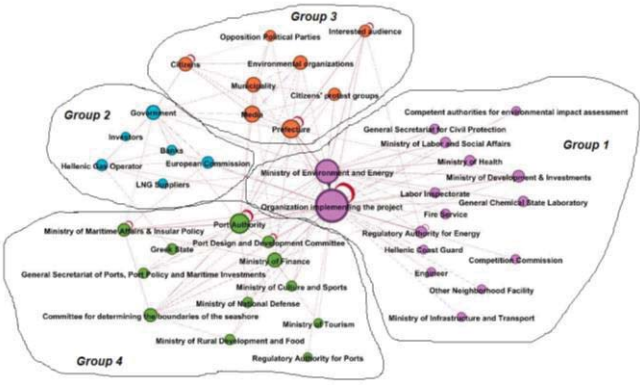


Figure 5:Social Network Graph presenting the four communities

Important connections: Analyzing the interactions it is noticed that strong relations exist between the following stakeholders:
- The Ministry of Environment and Energy and the Organization implementing the project.
- The Prefecture and the Ministry of Environment and Energy
- The Ministry of Maritime Affairs & Insular Policy and the Port Authority
- The Organization implementing the project and the Energy Regulatory Authority

DISCUSSION

The analysis of the network showed that many stakeholders are involved in the design phase of an LNG bunkering facility. The increased legislative requirements in this phase (i.e. related to permitting) mainly determine the relationships among the stakeholders. It has been also demonstrated that the Organization implementing the project, the Ministry of Environment and Energy and the Port Authority are the key stakeholders.

The interactions seen on the network are related to activities which aim to realize needs (i.e. explicitly defined requirements) and expectations (i.e. desired requirements) and thus the related decisions may influence the project objectives set by the Organization implementing the project, positively or negatively.

Therefore, the Organization implementing the project should take into consideration that decisions taken from stakeholders which have strong interactions may have important impact and that the related risks should be managed.

Ministry of Environment and Energy, Port Authority and the local Prefecture appear to have strong interactions with the Organization implementing the project thus uncertainty related to their decision should be taken into consideration and related risks should be managed. Impacts of these risks would delay or accelerate the permitting procedure and the design of the LNG facility.

Interested parties with high node degree value (i.e. larger nodes circles in the network) are related to decisions which may probably have important impact during the design phase of the LNG facility and therefore should be closely monitored.

Interested parties with low node degree value (i.e. smaller nodes circles) whose decisions may not probably have important impact during the design phase of the LNG facility should be simply monitored.

CONCLUSIONS

Discussion about use of LNG as a fuel is increasing significantly in the shipping sector, mainly due to the introduction of legislation by the International Maritime Organization (IMO) regarding the emissions of exhaust gases to environment from ships.

LNG has been considered as a preferable low emission solution (IMO, 2016b). However, LNG's use as a shipping fuel faces important challenges, mainly due to the lack of infrastructure, facilities, and important uncertainties/challenges regarding the adoption by the shipping industry. Risk Management is an appropriate method to take into consideration uncertainty and support the relevant decisions.

For an effective risk management, an Organization implementing the design and construction of an LNG bunkering facility should deeply understand its business environment dynamics, opportunities, and threats.

The current paper proposes a stakeholders' approach for managing risks,that includes a structured way for identifying and analyzing their interests, needs and expectations for the development of the project, and thus their potential influence on its objectives. The exploration of the relations and interactions among the stakeholders at various levels (e.g. strategic, operational, and legislative) would allow a justified evaluation of their power/ influence and their potential to create risks for the project.

Social Network Analysis (SNA) appears to be a promising method for assisting the modeling and analysis of the stakeholders' interests, interactions, and activities as part of a holistic risk management framework.

The current paper presented the application of this method for implementing stakeholders' analysis for the design of an LNG bunkering facility. It demonstrated the relative importance of the various interested parties, taking into account the extent of their involvement into important activities of this phase of the project, such as the permitting activities, the engineering studies, the

funding etc. The research will further examine the development of a methodology for considering the relative importance of these interactions for achieving the project's objectives.

The proposed approach for implementing risk management taking into account the stakeholders interactions and their potential to cause risks for a project or organization, is highly differentiated from existing popular event driven risk analysis methods as it focuses to the actors' interactions and decisions rather than to predicting of unexpected accidental conditions. The authors believe that this approach could serve risk management in general and not only the LNG bunkering operations.

ACKNOWLEDGMENTS

This research has been co-financed by the European Union and Greek national funds through the Operational Program Competitiveness, Entrepreneurship, and Innovation, under the call RESEARCH – CREATE – INNOVATE (project code: T1EDK-01727).

REFERENCES

Brugha, R., & Varvasovszky, Z. (2000). Stakeholder analysis: a review. *Health Policy and Planning*, *15*(3), 239–246. https://doi.org/10.1093/heapol/15.3.239

Buckingham, K., Morales, A. G., & Minnick, A. (2018). *Mapping Social Landscapes*. 96.

Ding, R., & Liu, F. (2011). A Social Network Theory of Stakeholders in China's Project Governance. *IBusiness*, *03*(02), 114–122. https://doi.org/10.4236/ib.2011.32017

European Maritime Safety Agency. (2017). Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administration. In *31 January*. https://www.parismou.org/sites/default/files/EMSA Guidance on LNG Bunkering.pdf

Faber, J., Singh, A., Ahdour, S., Hoen, M. 't, Nelissen, D., Steiner, P., Rivera, S., Raucci, C., Smith, T., Muraoka, E., Ruderman, Y., Khomutov, I., & Hanayama, S. (2016). *Assessment of Fuel Oil Availability*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Gephi-The Open Graph Viz Platform. (n.d.). https://gephi.org/

Hanneman, R. a, & Riddle, M. (2005). Introduction to Social Network Methods. In *Riverside, CA: University of California, Riverside. On-line textbook* (Vol. 46, Issue 7). https://doi.org/10.1016/j.socnet.2006.08.002

IMO. (2016a). The 2020 global sulphur limit. *International Maritime Organization*, *January*, 1–5. http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/FAQ_2020_English.pdf

IMO, I. (2016b). *STUDIES ON THE FEASIBILITY AND USE OF LNG AS A FUEL FOR SHIPPING*. www.imo.org

ISO. (2015a). *ISO/TS 16901:2015_Guidance on performing risk assessment in the design of onshore LNG installations including the ship/shore interface*.

ISO. (2015b). *ISO 9000:2015_Quality Management Systems – Fundamentals and vocabulary*.

ISO. (2016). *ISO 1473_Installation and equipment for liquefied natural gas — Design of onshore installations*.

ISO. (2017a). *ISO 20519:2017_ Ships and marine technology — Specification for bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels*.

ISO. (2017b). *ISO 16355_4-Analysis of non-quantitative and quantitative Voice of Customer and Voice of Stakeolder*. www.iso.org

MEPC, M. (2008). REVISED MARPOL ANNEX VI. In *RESOLUTION MEPC.176(58)*.

Mokhatab, S., Mak, J. Y., Valappil, J. V., & Wood, D. A. (2013). Handbook of Liquefied Natural Gas. In *Handbook of Liquefied Natural Gas*. https://doi.org/10.1016/C2011-0-07476-8

Prell, C., Hubacek, K., & Reed, M. (2009). Stakeholder analysis and social network analysis in natural resource management. *Society and Natural Resources*, *22*(6), 501–518. https://doi.org/10.1080/08941920802199202

Reed, M. S., Graves, A., Dandy, N., Posthumus, H., Hubacek, K., Morris, J., Prell, C., Quinn, C. H., & Stringer, L. C. (2009). Who's in and why? A typology of stakeholder analysis methods for natural resource management. *Journal of Environmental Management*, *90*(5), 1933–1949. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.001

Research to Action. (2012). *Social Network Analysis: A basic introduction*. https://www.researchtoaction.org/2012/05/social-network-analysis-a-basic-introduction/

Varvasovszky, Z., & Brugha, R. (2000). A stakeholder analysis. *HEALTH POLICY AND PLANNING*, *15*(3), 338–345. https://doi.org/10.5604/12303666.1215533

Zedan, S., & Miller, W. (2017). Using social network analysis to identify stakeholders' influence on energy efficiency of housing. *International Journal of Engineering Business Management*, *9*, 1–11. https://doi.org/10.1177/1847979017712629

PROPOSED OVERALL PERFORMANCE INDICATORS FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING MANAGEMENT IN MINING INDUSTRY

A. LAMJAHDI, H. BOULOIZ

Laboratory of Systems Engineering and Decision-making Support, National School of Applied Sciences Agadir, Morocco
Aichalamjahdi@gmail.com, h.bouloiz@uiz.ac.ma

M. GALLAB

LERMA-EMI, National School of Mines of Rabat (ENSMR), Morocco
Meryam09@gmail.com

ABSTRACT: *The mining industry is the source of the production of many consumer goods and equipment. Therefore, the companies that control this activity play a significant role in the global economy. However, it is an important source of pollution of water, air, soil and ecosystems by metals. It exploits fossil and non-renewable resources, requiring large amounts of energy and sometimes water. Thus, implementing a sustainable approach through an overall performance integration in manufacturing practices, has become a necessity in this industry. Hence, this paper proposes a group of key performance indicators for overall performance assessment and management in mining industry. The established indicators were defined and derived from literature based on the triple bottom line of sustainability of economic, social and environmental factors. A survey was carried out then, in a Moroccan mining industry to validate the adaptability of the chosen indicators with the industry activities and practices. Future work will further develop an assessment tool that will help managers to evaluate the overall performance in mining industry and to take the appropriate actions to increase its competitiveness.*

KEYWORDS: *Overall performance, sustainable manufacturing, key performance indicators, decision making, performance assessment, mining industry.*

1 INTRODUCTION

The idea of overall performance (OP) has emerged over the last decades and is used to assess the implementation of the sustainability approach in manufacturing process by companies (Capron and Quairel, 2006). Actually, regulations, consumers' interest and awareness and competitive opportunity (Linton et al., 2007), have forced manufacturing firms to adopt this strategy in their activities.

The integration of OP principles provides firms a cost-effective way to ameliorate simultaneously their economic, social, and environmental performances (Pusavec et al., 2010). Therefore, exploiting this concept has been considered to be positively related with increased market-share, better product quality and enhanced profit (Nambiar, 2010).

Due to its very varied geological structure, the Moroccan subsoil contains numerous mining deposits that are exploited on a large scale (phosphates, precious metals, useful substances, etc.) giving this sector a fundamental role in the national economy. However, the exploitation of these riches has an important effect on the environment and the health of the populations living around these sites. Indeed, the mining activity can unbalance the natural environments in several ways: by the transformation of the landscapes, the deposit of solid waste and the rejection of liquid and atmospheric effluents. This can inevitably harm the environment and the living environment of neighboring populations. (Giret et al., 2017). Thus, adopting an OP approach has become an emergent requirement for this industry.

In this paper, a literature review was conducted in order to identify indicators for OP assessment and evaluation. Therefore, a set of initial Key Performance Indicators (KPIs) is proposed based on the three pillars of sustainability of social, economic and environmental. The KPIs are then investigated throw a survey that was conducted in a Moroccan mining industry to confirm their adaptability with the industry practices. The proposed OP indicators will assists mining industry to evaluate and manage their OP and enhance their competitiveness, with respect to environment and society.

2 THE INITIAL KEY PERFORMANCE INDICATORS

The performance indicators can be defined as the physical values and measures which are utilized to evaluate, compare and pilot the overall performance of an organization (Gosselin, 2005). They do not simply report what has occurred; they impact what will occur, as they convey the essential data for managers to implement the progress plans that would influence the future competitive situation of the company (Lamjahdi et al., 2020).

The role of performance indicators is to report the actual state of manufacturing mechanisms, to surveil and manage the operational efficacy, to lead amelioration scenarios and to measure the viability of decisions (Hon, 2005).

A literature review was conducted to determine initial key performance indicators usually used in overall performance evaluation in manufacturing systems. Thus, research in sustainable performance evaluation and management has increased rapidly during the past recent few years. In our work, we focus especially on the last seven years to obtain an idea of the latest research in the field (see figure 1). We choose to establish the initial KPIs from recent literature that proved the implementation of KPIs in manufacturing, as described in (Helleno and Jos, 2017) and (Amrina and Vilsi, 2015), and from latest literature review articles that derived KPIs from different previous applications in industrial systems, like (Akbar and Irohara, 2018), and (Henao et al., 2018). Table 1 describes the results of our examination of 15 articles.

Table 1: Compilation of overall performance indicators [a]

OP dimensions	Indicators	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Economic	Compliance rate					x	x	x			x			x	x	
	Quality of products and services		x	x		x	x	x			x		x	x	x	
	Material cost	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x			x
	Energy cost	x		x	x											x
	Labour cost	x		x	x	x	x		x	x						x
	Operational and capital costs	x		x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	
	Delivery cost					x		x	x		x			x		x
	Net profit	x	x			x			x					x	x	x
	Rate of one time delivery					x	x	x			x		x	x	x	
	Product delivery					x	x	x		x						x
	Iinvestments in innovation and research and development		x			x	x	x	x					x	x	x
Environmental	Total water consumption	x	x	x	x		x		x	x	x	x		x		x
	Total energy consumption	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x		x		x
	Ratio of reused resources			x	x			x								x
	Amount of greenhouse gases generated	x		x	x		x	x	x	x	x	x		x		x
	Water waste discharge	x					x				x	x				x
	Solid and liquid waste produced	x			x		x		x		x	x				x
	Disposal of waste	x	x	x	x			x			x				x	
	Number of pollution prevention initiatives					x		x			x		x	x		
	Environmental certification					x		x			x		x	x	x	
Social	Injury rate	x			x	x		x		x	x	x			x	x
	Health related absenteeism rate	x	x		x	x										
	Occupational health & safety	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Employee turnover	x	x		x	x	x									
	Level of employee satisfaction		x	x	x	x	x		x			x				x
	Product health and safety impact assessment							x	x					x		x
	Investments in community development activities		x		x	x		x	x		x	x		x		x
	Gender Equity				x				x	x	x					
	Career development							x	x	x	x			x		
	Ratio of training hours	x	x		x		x			x		x				x
	Suppliers development				x		x	x			x		x			

[a] (1) (Akbar and Irohara, 2018); (2) (Helleno and Jos, 2017); (3) (Henao et al., 2018); (4) (Huang and Badurdeen, 2018); (5) (Ishaq Bhatti and Awan, 2014); (6) (Amrina and Yusof, 2011); (7) (Chardine-Baumann and Botta-Genoulaz, 2014); (8) (Joung et al., 2013); (9) (Amrina and Vilsi, 2015); (10) (Govindan et al., 2013); (11) (Tseng, 2013); (12) (Azadnia et al., 2012); (13) (Hsu et al., 2017); (14) (Lim et al., 2017); (15) (Singh et al., 2016),

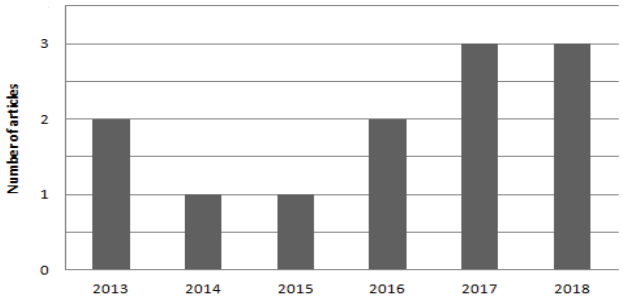


Figure 1: Reviewed articles by year

The established initial KPIs pursued the triple bottom line of sustainability containing three dimensions of social, environmental, and economic performance. Therefore, our set of indicators includes 3 dimensions with 18 indicators in total as shown in Table 2.

Table 2: Initial KPIs of overall performance evaluation

Overall Performance dimensions	Indicators
Economic	1. Quality of products and services
	2. Material cost
	3. Labour cost
	4. Operational and capital costs
	5. Net profit
	6. Rate of one time delivery
	7. Investments in innovation and research and development
Environmental	8. Total water consumption
	9. Total energy consumption
	10. Amount of greenhouse gases generated
	11. Solid and liquid waste produced
	12. Disposal of waste
	13. Environmental certification
Social	14. Injury rate
	15. Occupational Health & Safety
	16. Level of employee satisfaction
	17. Investments in community development activities
	18. Ratio of training hours

3 INDUSTRIAL SURVEY

So as to verify the established initial KPIs in mining industry, a survey was carried out to a mining manufacturing company in Morocco. Founded in 1920, the company is Morocco's largest mining group, with four mine sites and two chemical complexes, as well as other international sites, 160 clients across 5 continents and a 2018 turnover of $5.5 billion. The firm has been certified by ISO 45001, ISO 9001 and ISO 14001.

For this study, a questionnaire was distributed to a total of 12 managers (3 from each site) of production division in order to investigate the established KPIs on the basis of their firm's practices and their personal experiences in managing mining projects overall performance. The respondents were asked to rate their level of importance of each KPIs of OP evaluation in the mining industry, using a four-point likert scale ranging from 1(not important) to 4 (very important). Table 3 presents the mean importance for each indicator ranged from 2,909 to 4,000.

Table 3: Mean importance for OP indicators

Indicators	Mean
Injury rate	4,000
Occupational Health & Safety	3,818
Total energy consumption	3,727
Quality of products and services	3,636
Net profit	3,545
Total water consumption	3,545
Material cost	3,455
Level of employee satisfaction	3,455
Rate of one time delivery	3,455
Amount of greenhouse gases generated	3,364
Iinvestments in innovation and research and development	3,364
Investments in community development activities	3,364
Ratio of training hours	3,364
Operational and capital costs	3,273
Solid and liquid waste produced	3,273
Environmental certification	3,182
Labour cost	3,000
Disposal of waste	2,909

The results show that injury rate is considered as the most important indicator for OP evaluation in mining industry with a mean importance value of 4 followed by occupational health & safety with a mean importance value of 3,818. This reveals that the mining industry in Morocco focus more on the social dimension while evaluating firm's OP. This can be explained by the social responsibility approach that mining companies in Morocco put in their priorities to develop their attractiveness and strengthen their competitiveness and foreign direct investment (Boyer and Scotto, 2013).Other indicators are respectively total energy consumption (mean importance value = 3,727) as third important indicator, quality of products and services (mean importance value = 3,636) as fourth important indicator and net profit and total water consumption as fifth important indicators with a same mean importance value of 3,545.This is not unexpected, since the company is a leader in mining sector and its high perception of quality and net profit is inevitable. Similarly, it is evident that environmental dimension (energy and water consumption) is given an important concern while the nature of this activity require large amounts of energy and water. However, environmental certification, labour cost and disposal of waste are considered the least important indicators for OP evaluation in mining industry. The reason for this is probably the project managers priorities in mining projects, they tend to put

more focus on performance indicators related directly to the project like quality and give less concern to performance issues indirectly related to their project management objectives.

In light of the results, the initial KPIs of overall performance assessment in mining industry have been changed. Environmental certification, labour cost and disposal of waste were eliminated from the established initial KPIs, because of their less importance in mining industry. Therefore, as presented in figure 2, three dimensions with a total of fifteen indicators have been suggested as the KPIs for OP assessment in mining sector.

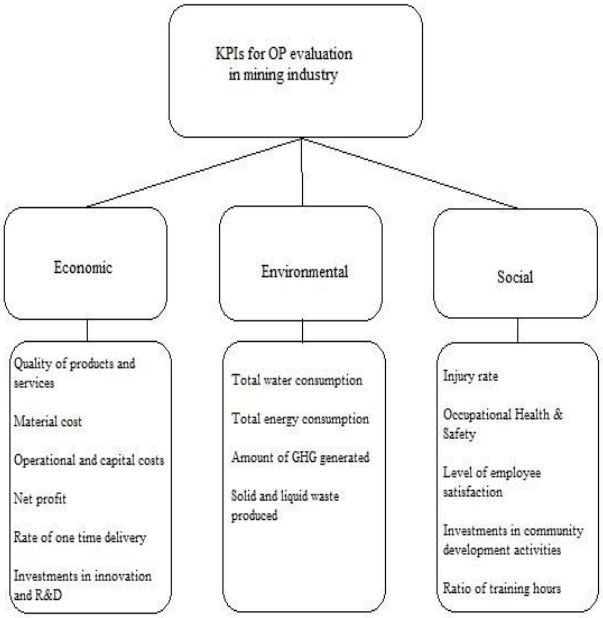


Figure 2: KPIs for OP evaluation in mining industry

4 CONCLUSION

The OP is an important factor for manufacturing companies, in response to the growing preoccupations for sustainability, to check their commitment in this strategy in terms of social economic and environmental predefined goals and targets. Thus, in the mining sector, operations consume large amounts of water, fuels, energy and disturb natural lands that have been home to many species and ecosystems.

Therefore, implementing an OP approach in this industry has become indispensable. In this paper, a group of OP indicators was defined to facilitate the evaluation and integration of sustainability in mining industry. The initial KPIs were identified from recent literature about sustainable manufacturing applications in industry. The proposed indicators were then examined using a survey in a Moroccan mining industry to determine the important KPIs for this industry and validate their adaptability to its practices and processes. Finally, three dimensions with a total of fifteen indicators are suggested as the KPIs for OP assessment and management in mining industry.

The proposed indicators are believed to help and assist mining industry to integrate sustainability in their manufacturing practices, and to perceive and understand their real performance state. It provides information and directions to managers to take best decisions aiming at a balance amongst social equity, environmental protection and economic development. Future work will further focus on the development of an evaluation model based on the established initial KPIs. This model will be useful for OP management and implementation in mining industry to achieve a raised overall performance and enhanced competitiveness.

REFERENCES

Akbar, M. and Irohara, T. (2018), "Scheduling for sustainable manufacturing: A review", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, available at:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.100.

Amrina, E. and Vilsi, A.L. (2015), "Key Performance Indicators for Sustainable Manufacturing Evaluation in Cement Industry", *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., Vol. 26, pp. 19–23.

Amrina, E. and Yusof, S. (2011), "Key Performance Indicators for Sustainable Manufacturing Evaluation in Automotive Companies", *Proceeding of the 2011 IEEE IEEM*, pp. 1093–1097.

Azadnia, A.H., Saman, M.Z.M., Wong, K.Y., Ghadimi, P. and Zakuan, N. (2012), "Sustainable Supplier Selection based on Self-organizing Map Neural Network and Multi Criteria Decision Making Approaches", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Elsevier B.V., Vol. 65, pp. 879–884.

Boyer, A. and Scotto, M.-J. (2013), "Corporate governance and social responsibility in Morocco", *Management & Avenir*, pp. 165–186.

Capron, M. and Quairel, F. (2006), "Evaluating the firms' sustainable development strategies: the utopia mobilizing global performance", *Review of the Responsible Organization*, Vol. 1, pp. 5–17.

Chardine-Baumann, E. and Botta-Genoulaz, V. (2014), "A framework for sustainable performance assessment of supply chain management practices", *Computers and Industrial Engineering*, Elsevier Ltd, Vol. 76 No. 1, pp. 138–147.

Giret, A., Trentesaux, D., Salido, M.A., Garcia, E. and Adam, E. (2017), "A holonic multi-agent methodology to design sustainable intelligent manufacturing control systems", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, available at:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.079.

Gosselin, M. (2005), "manufacturing firms An empirical study of performance measurement in

manufacturing firms", *International Journal of Productivity and Performance Management*, Vol. 54 No. 5, pp. 419–437.

Govindan, K., Khodaverdi, R. and Jafarian, A. (2013), "A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, Vol. 47, pp. 345–354.

Helleno, L. and Jos, A. (2017), "Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes : Application case studies in Brazilian industry", Vol. 153, available at:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.072.

Henao, R., Sarache, W. and Gómez, I. (2018), "Lean Manufacturing and Sustainable Performance : Trends and Future Challenges", available at:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.116.

Hon, K.K.B. (2005), "Performance and Evaluation of Manufacturing Systems", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 54 No. 1, pp. 139–154.

Hsu, C., Chang, A. and Luo, W. (2017), "Identifying key performance factors for sustainability development of SMEs - integrating QFD and fuzzy MADM methods", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, Vol. 161, pp. 629–645.

Huang, A. and Badurdeen, F. (2018), "Metrics-based Approach to Evaluate Sustainable Manufacturing Performance at the Production Line and Plant Levels", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier B.V., available at:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.234.

Ishaq Bhatti, M. and Awan, H.M. (2014), "The key performance indicators (KPIs) and their impact on overall organizational performance", *Quality and Quantity*, Vol. 48 No. 6, pp. 3127–3143.

Joung, C.B., Carrell, J., Sarkar, P. and Feng, S.C. (2013), "Categorization of indicators for sustainable manufacturing", *Ecological Indicators*, Elsevier Ltd, Vol. 24, pp. 148–157.

Lamjahdi, A., Bouloiz, H. and Gallab, M. (2020), "Toward a model to apprehend the complexity of manufacturing firm ' s overall performance", *International Journal of Engineering Business Management*, Vol. 12, pp. 1–20.

Lim, M.K., Tseng, M., Hua, K. and Dat, T. (2017), "Knowledge management in sustainable supply chain management : Improving performance through an interpretive structural modelling approach", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, Vol. 162, pp. 806–816.

Linton, J.D., Klassen, R. and Jayaraman, V. (2007), "Sustainable supply chains : An introduction", *Journal of Operations Management*, Vol. 25, pp. 1075–1082.

Nambiar, A.N. (2010), "Challenges in Sustainable Manufacturing", *Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Dhaka, Bangladesh, January 9-10,* pp. 10–15.

Pusavec, F., Krajnik, P. and Kopac, J. (2010), "Transitioning to sustainable production – Part I : application on machining technologies", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, Vol. 18 No. 2, pp. 174–184.

Singh, S., Olugu, E.U. and Musa, S.N. (2016), "Development of Sustainable Manufacturing Performance Evaluation Expert System for Small and Medium Enterprises", *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., Vol. 40, pp. 609–614.

Tseng, M.L. (2013), "Modeling sustainable production indicators with linguistic preferences", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, Vol. 40, pp. 46–56.

13the International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'20 – November 12-14, 2020- Agadir – Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

RECURSIVE HYBRID CONTROL ARCHITECTURE TO DEAL WITH REACTIVITY IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

Tsegay Tesfay MEZGEBE*

Mekelle University, EiT-M, Main Campus
Mekelle, Ethiopia
Université de Lorraine, CRAN, UMR 7039,
Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France
tsegay.tesfay@mu.edu.et,
tsegay-tespay.mezgebe@univ-lorraine.fr

Hind Bril El HAOUZI

Université de Lorraine, CRAN, UMR 7039
Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France
hind.el-haouzi@univ-lorraine.fr

ABSTRACT: *As a response to unexpected events sourced either from external environment or internal environment, manufacturing companies have to decide and adjust their system autonomously. Indeed, this has brought significant reactivity, adaptability, and stability to disturbances and production changes. However, an ever myopic behavior of locally autonomous entities has led such decision-making process to various drawbacks such as difficulty to get immediate information for performing global decision. Consequently, the interest of hybrid control system has evolved using holonic or multi-agent system paradigms so as to provide an overall and efficient production performance. This paper is aimed to provide state-of-the-art on holonic reference architectures and multi-agent system paradigms and to propose recursive hybrid control architecture by stipulating two decision-making layers namely white-collar layer and blue-collar layer. The decision-making is mainly managed by locally autonomous decision entities incorporated in the blue-collar layer with interfacing and updating role of white-collar entities in the white-collar layer. This layer based control architecture is proposed to fit with the emergence of Cyber Physical System (CPS) and the need of dynamic switching in hybrid control architecture.*

KEYWORDS: *Hybrid, Cyber physical System, Control architecture, Blue-collar, White-collar*

1 INTRODUCTION

In today's competitive world, globally volatile market is one of the biggest troubles for manufacturing industries. Factors such as requirement reactive and adaptive system, shorter life cycle, customized products etc. made this trouble vital. The framework of Industry 4.0 is also urging them to deal with technological advancement in information and communication for effective management of knowledge required for the need to regularly update and reconfigure their system. While struggling to satisfy these factors, the manufacturing industries may impose with new challenges and varieties which in turn these challenges are forcing them to look for new solutions. At this time, it is critical to search for control systems that provide efficient planning of tasks to resources and quickly adapt and react to unexpected events occurred. Accordingly, different control systems in different views, behavioral views (El Haouzi, 2017) and structural views (Dilts *et al.*, 1991; Rey *et al.*, 2013) for instance, have been introduced and implemented so far.

Structurally, the control system can be catagorized as central, hierarchical, heterarchical, and hybrid. Each of them has shown merits with capability to react and adapt to unexpected event(s) though the impact varies. Through time, the interest on hybrid control system is increasing as it couples the high and predictable performance promised by centralized control approach with the robustness of distributed reactive control against disturbances based on the reactivity of Cyber Physical System (Jimenez *et al.*, 2017; Valckenaers and Handrik Van Brussel, 2016). It is studied and proposed by different researchers since the last decade. (Zambrano *et al.*, 2011) and (Rey *et al.*, 2014) for example have presented the need of coupling hierarchical and heterarchical control architectures to manage myopia.

This paper is aimed to provide a state-of-the-art on holonic and multi-agent system (MAS) reference architectures and to propose a Recursive hybriD Control Architecture (REDCA). The novelty is to present the use of two interlinked decision-making layers namely white-collar layer and blue-collar layer in order to minimize impact of unexpected events(s) occurred and to perform a dynamic role switching manufacturing system's autonomous entities. The rest of the paper is organized as follow: Section 2 explicitly surveys related materials. Section 3 follows with proposing the recursive hybrid control architecture and its executability explanations. Finally, a concluding remark and future perspectives are presented in section 4.

2 SURVEY ON RELATED WORKS

The autonomously reactive and centrally predictive behaviors of decision entities in distributed reactive control mode and central predictive control approach

respectively are encouraging for control systems change. As a response to this changing call, coupling these two control approaches is believed to minimize their over shadowing drawbacks. According to (Cardin *et al.*, 2017) and (Jimenez *et al.*, 2017), for instance, minimizing these drawbacks is highly dependent on the way how these two control approaches could be combined. Holonic manufacturing system and multi-agent system paradigms have been handed-over the coupling procedure in order to stabilize manufacturing execution system at glance and performance of whole system then after. Even though both paradigms have a lot in common, the multi-agent system provides multi-domain functions through its cooperative and competitive agents while the holonic manufacturing system is used mainly in manufacturing domain through its inherently cooperative holons. This indicates that the search for an effective implementation of holonic reference architectures and multi-agent system paradigms remains a subject of great attractiveness in the community of researchers working on agile-adaptable system.

2.1 Fundamentals on Holonic Manufacturing System (HMS) reference architectures

HMS provides reactivity to disturbances, flexibility to changes, and efficient usage of resources. It has got much attention due to its fitness to create synchronized control system during unexpected disturbances (Jarvis *et al.*, 2008) and its fitness to satisfy the requirements of industry 4.0. Three main holonic control architectures have been studied and elaborated by different researchers in the previous decades: Product-Resource-Order-Staff (PROSA) reference Architecture, ADAptive holonic COntrol aRchitecture (ADACOR), and Holonic component-based architecture (HCBA).

PROSA is considered as reference architecture for other HMS architectures. It identifies types of holons necessary for any manufacturing system, its responsibilities, and interaction structure in which they cooperate. According to (Van Brussel *et al.*, 1998) and (Valckenaers and Hendrik Van Brussel, 2016), PROSA is built from three holons: product, resource, and order holons. Staff holon is added to assist these basic holons with expert knowledge. Product holon stores process and product knowledge needed to insure the correct execution of the product with sufficient quality. Resource holon is an abstraction of the production means, such as machines, conveyors, pallets, raw materials, tool holders, material storage, personnel, floor space etc. (Valckenaers *et al.*, 2007). Besides, a resource holon offers production capacity and functionality to the other holons. An order Holon is responsible for doing the work assigned on time and in the right way (Giret and Botti, 2006). It interprets a task within a system and hence prepares a work assigned optimally. Meanwhile, it manages the physical product being processed, the product-state model, and all logistic information related to a job (Valckenaers *et al.*, 2007).

ADACOR, by (Leitão and Restivo, 2006), uses a pheromone-like propagation mechanism to deal with myopic phenomenon by introducing a supervisory holon. It defines a holonic approach for dynamic adaptation and agility in the face of frequent perturbations within flexible manufacturing systems. It is based on a group of autonomous and cooperative holons in order to represent factory components. These holons have an autonomy factor that adapts the holon's autonomy according to its environment (Rey *et al.*, 2013). A low-autonomy factor implies following supervisory advice and a high-autonomy factor allows self-organization and local problem-solving in case of perturbations. Once perturbation is occurred, the locally autonomous holons switch to heterarchical mode and manage their problem (perturbation) without the involvement of supervisory holon. ADACOR groups the holons of a manufacturing system into product holons, task holons, operational holons, and supervisor holons. The supervisory holon introduced in this architecture has specifity over that of the staff holon in PROSA. For instance, it has capability to form group of holarchy and it is in charge of triggering schedules periodically. Each product is represented by one product holon that has all of the product-related knowledge and is responsible for the process planning. To this end, product holon stores information about the product structure and the process planning to produce it. Every manufacturing order is represented by a task holon, which is responsible for controlling and supervising a production execution. The operational holons represent the physical resources of the factory, such as human workers, robots and machines. They manage the behavior of these resources based on their goals, constraints and capabilities, and try to optimize their agenda.

HCBA, much like PROSA, serves as a reference model for numerous implementations and applications of holonic systems. (Chirn and McFarlane, 2000) and (Farid, 2004) have testimonied that HCBA is derived from the concepts of component-based development (CBD) that provides a guideline for HCBA. As it is presented in (Botti and Giret, 2008) and (Chirn and McFarlane, 2000), HCBA defines two major holons: product and resource holons. The resource holon is an embedded system component that can execute operations such as production, assembly, transportation, and checking. The product holon may contain a physical part such as raw materials, product parts and a controlling part may represent the path controlling a production line, process control, decision-making, and product information.

To sum-up, holonic reference architectures have been studied by the holonic community and clearly showed that they are capable to minimize impact of perturbations on a holonic system. However, the setup for holonic structure requires high effort and hence development of

holonic control applications is sophisticated. This is because modeling of complex dynamic systems is costly and incurs significant processing overhead due to the demand for powerful modeling platforms (Dorri *et al.*, 2018). Hence, the flexibility, autonomy and scalability afforded by agents made agent-based modeling a low-cost and low resource solution for modeling complex systems (Dorri *et al.*, 2018). Subsequently, the developments in multi-agent communication have evolved significant interest and research activity in the area of cooperative MAS.

2.2 Fundamentals on Multi-agent System (MAS) paradigm

MAS consists of society of agents that could potentially cooperate with each other and their outer environment in order to perceive, reason, and converge to a suitable solution (Botti and Giret, 2008; Isern *et al.*, 2011; Wooldridge, 2009). In the intelligent manufacturing system domain, it is well accepted that MAS based control system is a good way to deal with disturbances and production changes. It provides software packages for the implementation of HMS through cooperative algorithm such that each agent's beliefs are brought to negotiation until all neighboring agents reaches at their final offer (Farid, 2004). Agents in such control system are characterized by their autonomy in which decisions at the time of necessity are made by these agents. This helps to create robust system with respect to time-evolving communication. In (Holvoet and Valckenaers, 2006; Isern *et al.*, 2011; Jennings *et al.*, 2001; Leitão, 2009; Maturana Shen and Norrie, 1999; Ryu and Jung, 2003; Wong *et al.*, 2006; Xiong and Fu, 2018), it is clearly presented that the applicability of MAS is characterized by their large scale in terms of number of agents, dynamic nature, and complex functionality. In Ryu and Jung (2003), for instance, the concept of fractals as autonomous cooperating agents to discuss fractal manufacturing systems is introduced. Maturana *et al.* (1999) in turn introduced adaptive multi-agent manufacturing system architecture with capability to facilitate multi-agent coordination by minimizing communication and processing overheads.

2.3 Synthesis and discussion

Plenty of researchers have given owed concentration to holonic and multi-agent manufacturing reference architectures and paradigms to provide efficient production performance and ensure reactivity face to unpredicted events. However, several issues left unsolved such as autonomy of decisional entities and legal aspects to represent sociability challenges, development of interaction mechanisms and protocols, design of decision models and control architectures, issue of introduction and implementation of technological solutions to explain some of them. To emphasize these challenges, Cardin *et al.* (2017) in their state of the artwork, for example have pointed out three confusing choices by decision entities to reschedule a perturbed discrete manufacturing system: (a) do nothing (b) decide autonomously and (c) decide by shrinking towards central scheduler. Cardin *et al.* (2017) have also presented that three main challenges still need to be investigated in the next few research years: (I) Estimation of future performances (II) Design of efficient synchronization (III) Design of efficient switching strategies integrated into a hybrid control architecture which this work has given attention.

This indicates that further effort and exploration on control architectures with a target to provide all components of manufacturing system decide immediately while they face unexpected events is still a demanding research area. Besides, even though, both the holonic and multi-agent systems have a lot in common to model and implement these control architectures, the applicability domain of MAS is very wider than that of the holonic paradigm. For example, many researchers have given due attention to the applicability of sociability-based multi-agent systems for controlling communication problems in the field of networking sciences, sociology, anthropology, philosophy, economics etc. However, its applicability for manufacturing control problems was highly comprehended with challenges such as difficulty to guarantee minimal level of information and operational performance, difficulty of cooperation, lack of commercial platforms (Jimenez *et al.*, 2017; Rey *et al.*, 2014) etc. Meanwhile, several challenges within the manufacturing systems such as design of decision model, design of interaction protocols, integration of technological solutions, dynamic switching role of entities remains yet unsolved. In the framework of solving these challenges in general and the last point in particular, agent-based recursive hybrid control architecture is proposed and explained in this paper; section 3.

3 PROPOSITION: A RECURSIVE HYBRID CONTROL ARCHITECTURE (REDCA)

In the framework of effort to design and implement hybrid control architecture, REDCA (structurally semi-heterarchical and behaviorally reactive) is proposed with its suitability to create reactive, sociable, cooperative, and adaptable manufacturing systems at the time of perturbations. It is an extended version of VSM-based work proposed by Herrera *et al.* (2011) by taking the recursiveness[1] and legacy system of the work. However, REDCA differs from Herrera *et al.* (2011)'s model by the level of implementability and capacity of adjusting perturbation(s). To adjust a perturbation(s), the different aggregation levels in Herrera *et al.* (2011)'s model were limited to either waiting until final decision is distributed by a central entity or splitting work-in-progress products

[1]Recursion inside an operating unit, same configuration exists with local regulation and local management and all decisional entities decide at their own level; Stafford Beer's Viable System Model

to neighbor machines which are working for same lot. This indicates that the model was not able to clearly show a layer-based contribution of each aggregation level. Moreover, it is a product agent who plays all the roles in optimizing the system while the other agents (for example machine agents) have contributing role. Consequently, REDCA is proposed to remedy these limitations by developing a layer-based control and execution system; Figure 1. It follows similar control functions as Viable System Model with self-adaptability in perturbed environment and indefinite repeatability (called recursion in this paper) in order to satisfy control requirements at very local and operational decision levels.

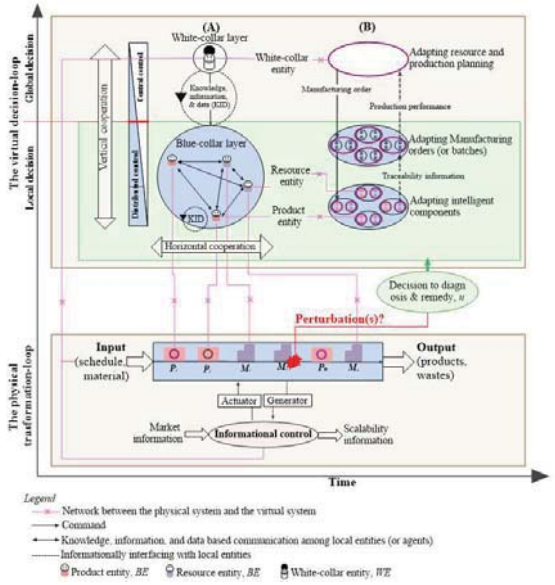


Figure 1: The REcursive hybriD Control Architecture

Meanwhile, REDCA is designed considering the concept of dynamic hybrid control system introduced in Pollux by Jimenez *et al.* (2017). Pollux used a layer-based control system organized into coordination layer, operation layer, and physical layer. Subsequently, REDCA has considered a wider operational specialty of blue-collar layer and an updating and interfacing[2] role of white-collar layer; see the structural architecture in Figure 1. The operation layer and physical layer of Pollux fall into the blue-collar layer in REDCA. Hence, REDCA is designed to satisfy the requirements (over Pollux and other control architectures) of scalability, dynamic role assignment of decision entities, better closeness to Enterprise Resource Planning, and better level of acceptability by workers of industrial enterprises. The concepts of white-collar and blue-collar, in this paper, are used to represent the role of global and local decision levels in the previously proposed control architectures respectively. Both terms came into common use in the 20th century to mean these who perform office/administrative level and clerical work within manufacturing industry respectively (Wroblewski, 2019). Furthermore, the work in white-collar is unstructured and non-routine whereas the work in blue-collar (also named as working class) is manual and/or operational with dirty hands.

[2]The role of decision entities in the white-collar layer is not as significant as that of decision entities in blue-collar layer

3.1 The decision entities

All the execution components within a manufacturing system are installed to perform the required actions proposed by decisional entities (Jimenez *et al.*, 2017). In REDCA, two groups of decision entities namely blue-collar decisional entities (*BE*) and white-collar decisional entities (*WE*) are introduced to perform cooperative participations for their common goal and/or objective. In order to make the required decision, all the decision entities consider different parameters, variables, communication protocols (such as broadcasting) etc.

3.1.1 White-collar entities (WE)

They are engaged to prepare production and resource plan through Human-machine interfacing, Enterprise resource planning etc. Once demand management and resource plan are developed at ERP level, a manufacturing order (MO), through MPS, is dispatched using these entities to resources for executing the required operations. These entities are also aimed to declare external changes such as rush order such that if this external change is requested after an online-execution, the locally impacted entities shift their behavior to this white-collar entity in order to declare this change. This proves that white-collar entities decided both in offline and online sub-systems. On the other hand, the layer-based organization of REDCA differs from that of Pollux on the role of these white-collar entities. The decision entities in coordinating layer of Pollux, which are parallel to the white-collar entities in REDCA, are responsible for global production optimization by hosting a predictive decision-making technique to guide the achievements of goals while the white-collar entities in REDCA are used for updating and interfacing role only. That is, once perturbation is occurred, the global decision entity in Pollux has equal decision level with the local entities where as in REDCA, the white-collar entities becomes out of the decision-loop after the perturbation is occurred even though there is dynamic role assignment of decision entities within the blue-collar layer.

3.1.2 Blue-collar entities (BE)

These entities are dedicated to perform the required execution ordered by white-collar entities and to rule a decision-making process at the time of local perturbation occurrence. Each blue-collar entity has its own recursive control kernel and this recursiveness continues until the last operation of a product is completed in a given time horizon (Bae, 2019; Herrera *et al.*, 2011). After perturbation occurred, the decision-making process

begins by sensing the perturbed area through sensors (RFID technology for example) and it uses knowledge, information, and data of the affected decision entities. Then after, they cooperate and diagnose the unexpected event occurred, either through changing their behavior to white-collar entity (the first recursion within the distributed reactive control mode) or acting as blue-collar entities. This behavioral change of locally impacted decisional entities in to white-collar entity makes REDCA dynamic. This continues until the unexpected event is no longer a limiting factor. Likewise, the affected blue-collar entities do not look to be helped either from entities in the white-collar layer or blue-collar entities which are not part of the unexpected event. This confirms the non-universal decision-making process at the time of perturbation. Product entities and resource entities constitute this blue-collar entity with strong horizontal cooperation between them.

Product entities, constructed with different product types for different manufacturing orders, are the leading constituent elements within the entire decision loop shown in Figure 1. The aggregated decision levels in Figure 1(B) are instantiated using knowledge, information, and data provided by these entities. Depending on the required communication with, they organize a production process for their different operations by considering their current state and broadcasting their intention to neighbor product entities or available resource entities. They have informational part to assure they are intelligent enough; the first cyber-physical system. This informational part, which has memory on which data and operational requirements are stored, is in charge of transmission of manufacturing orders to resources, reasoning capabilities, and validation of key performance indicators. Moreover, it is a required function to create and manage other neighbor entities. It also accepts/refuses a configuration change using its environemental knowledge and asks/accepts/refuses to swap its configuration with neighbor product entities.

Resource entities, configured with hardware parts (machines, conveyer, routers, sensors, production controllers etc.) and control parts in order to provide recursive services for product entities. The hardware part executes operations requested by product entities. The control part monitors the hardware operations by hosting attributes such as adaptive capacity and manages tasks assigned to its hardware part. It is shown in the physical transformation-loop of Figure 1 that the sensors and actuators follow commands received from product entities (at this instance, the behavior of the product entity is acting as white-collar entity) to perform the required process. Once the white-collar entities pass a central schedule to these entities for executing, they return inform their availability to execute the required operation. This confirms their role to coordinate the entire system.

3.2 Structural organization of the control architecture

The structural arrangement of REDCA is organized into two layers namely white-collar and blue-collar layers.
White-collar layer is an offline sub-system to coordinate a system towards global performance by preparing production and resource plan through mixed integer programing for example. Once demand management and resource planning are developed at ERP level, a manufacturing order (*MO*) is dispatched to a shop floor by white-collar entities (*WE*) in this layer at periodical time. The manufacturing orders in Figure 1(B) have set of attributes such as order number, due date, quantity etc. and each manufacturing order has its own product classifications defined by its product's current state. Meanwhile, this layer informationally interfaces with the blue-collar layer while the blue-collar entities in the blue-collar layer generate their executed output; see the production performance declaration in Figure 1(B).
Blue-collar layer is an online sub-system for operational execution of the manufacturing orders dispatched by white-collar layer and for controlling the available executing resources. It is represented by blue-collar entities (*BE*) responsible for production performance declaration, traceability information, and agile reactivity to unexpected events occurred in addition to the execution control. Decision entities in this layer have dynamic behavior to assign a role among each other (for example blue-collar entities may change their behavior in to white-collar entities within this layer until the required perturbation is addressed) and this continues until the last operation of a product is completed in a given time horizon. However, after the perturbed sub-system is adjusted, the entities in this layer generate the improved system to the white-collar layer for their informational purpose only.

4 CONCLUSION AND FUTURE REMARKS

This paper has presented state-of-the-art on holonic reference architectures and MAS paradigms and their role in reducing the impact of unexpected events (or perturbations in this paper) on manufacturing systems. It then proposed recursive hybrid control architecture (REDCA) by stipulating two decision-making layers namely white-collar layer and blue-collar layer. The decision-making in the proposed architecture was mainly managed by locally autonomous decision entities incorporated in the blue-collar layer with interfacing and updating role of white-collar entities in the white-collar layer. REDCA was designed to satisfy the requirements (over other control architectures such as Pollux) of scalability, dynamic role assignment of decision entities, better closeness to ERP, and better level of acceptability by workers of industrial enterprises. Two algorithms, through the work of (Mezgebe *et al.*, 2019a), Mezgebe *et al.*, 2019b), have developed and implemented before this work by considering the role of the blue-collar entities but with capability of one of these blue-collar entities to

dynamically act as white-collar entity at the time of unexpected event(s). This dynamism is one of the novelty and applicability roles of these entities. Likewise, these two works confirms the applicability of REDCA in any industrial systems.

However, REDCA is closely positioned to distributed reactive control system. This indicates that even though the white-collar entities are involved in the decision–making process, the basic decisions are made at blue-collar level. This clearly presents the limitation of the proposed control architecture. In order to bring significant impact of all the decision entities, they must equally oscillate towards the distributed reactive control mode and centrally predictive control approach depending on the type of perturbation(s) a manufacturing system faces. The slack interaction of the white-collar entities must be changed to direct interaction and a full study of decision parameters needs to be showed. This will be the significant work expected after this work.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support of the CPER 20152020 Projet Cyber-Entreprises du programme Sciences du numérique, through regional (Région Lorraine, Grand EST), national (DRRT, CNRS, INRIA) and European (FEDER) funds used to extend The TRACILOGIS Platform.

REFERENCES

Bae, Sammie, 2019. Recursion. *In JavaScript Data Structures and Algorithms. Springer, p. 99-115*

Botti Vicent and Adriana Giret, 2008. *ANEMONA: A Multi-Agent Methodology for Holonic Manufacturing Systems,* Springer Science & Business Media.

Cardin, Olivier, Damien Trentesaux, André Thomas, Pierre Castagna, Thierry Berger, and Hind Bril El-Haouzi, 2017. Coupling Predictive Scheduling and Reactive Control in Manufacturing Hybrid Control Architectures: State of the Art and Future Challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing, 28(7),* p. 1503–17.

Chirn, Jin-Lung and Duncan C. McFarlane, 2000. A Holonic Component-Based Approach to Reconfigurable Manufacturing Control Architecture. *In Database and Expert Systems Applications, 2000. Proceedings. 11th International Workshop on. IEEE,* p. 219-223

Dilts, David M., Neil P. Boyd, and H. H. Whorms, 1991. The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Systems,* 10(1), p. 79–93.

Dorri, Ali, Salil S. Kanhere, and Raja Jurdak 2018. Multi-Agent Systems: A Survey. *IEEE Access*, 6, p. 28573–93.

El Haouzi, H.B., 2017. *Contribution à La Conception et à l'évaluation Des Architectures de Pilotage Des Systèmes de Production Adaptables: Vers Une Approche Anthropocentrée Pour La Simulation et Le Pilotage.* Habilitation à Diriger Des Recherches, Université de Lorraine, France.

Farid, A., 2004. *A Review of Holonic Manufacturing Systems Literature,* University of Cambridge Institute for Manufacturing, Cambridge UK, Tech. Rep.

Giret, Adriana, and Vicente, Botti, 2006. From System Requirements to Holonic Manufacturing System Analysis. *International Journal of Production Research*, 44(18–19), p. 3917–28.

Herrera, C., André Thomas, Sana Belmokhtar, and Rémi Pannequin, 2011. A Viable System Model for Product-Driven Systems. *In International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, IESM 2011.

Holvoet, Tom, and Paul, Valckenaers, 2006. Exploiting the Environment for Coordinating Agent Intentions. *In International Workshop on Environments for Multi-Agent Systems,* Springer, p. 51-66.

Isern, David, David Sánchez, and Antonio Moreno, 2011. Organizational Structures Supported by Agent-Oriented Methodologies. *Journal of Systems and Software*, 84(2), p. 169–84.

Jarvis, Jacqueline, Dennis Jarvis, Ralph Rönnquist, and Lakhmi C. Jain, 2008. Holonic Manufacturing Systems. *Holonic Execution: A BDI Approach,* p. 7–16.

Jennings, Nicholas R., Peyman Faratin, Alessio R. Lomuscio, Simon Parsons, Michael J. Wooldridge, and Carles Sierra, 2001. Automated Negotiation: Prospects, Methods and Challenges. *Group Decision and Negotiation*, 10(2), p. 199–215.

Jimenez, Jose-Fernando, Abdelghani Bekrar, Gabriel Zambrano-Rey, Damien Trentesaux, and Paulo Leitão, 2017. Pollux: A Dynamic Hybrid Control Architecture for Flexible Job Shop Systems. *International Journal of Production Research*, 55(15), p. 4229–47.

Leitão P., 2009. Agent-Based Distributed Manufacturing Control: A State-of-the-Art Survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7), p. 979–91.

Leitão, P., and Francisco R., 2006. ADACOR: A Holonic Architecture for Agile and Adaptive Manufacturing Control. *Computers in Industry*, 57(2), p. 121–30.

Maturana, Francisco, Weiming Shen, and Douglas H. Norrie, 1999. MetaMorph: An Adaptive Agent-Based Architecture for Intelligent Manufacturing. *International Journal of Production Research*, 37(10), p. 2159–73.

Mezgebe, T. T., Demesure, G., El Haouzi, H.B., Pannequin, R., Thomas, A., 2019a. CoMM: A Consensus Algorithm for Multi-Agent-Based Manufacturing System to Deal with Perturbation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), p. 3911–26.

Mezgebe, T.T., El Haouzi, H.B., Demesure, G., Pannequin, R., Thomas, A., 2019b. Multi-Agent Systems Negotiation to Deal with Dynamic

Scheduling in Disturbed Industrial Context. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6), p. 1367-1382.

Rey, G. Z., Thérèse Bonte, Vittaldas Prabhu, and Trentesaux, D., 2014. Reducing Myopic Behavior in FMS Control: A Semi-Heterarchical Simulation–Optimization Approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 46, p. 53–75.

Rey, G. Z., Cyrille Pach, Nassima Aissani, Abdelghani Bekrar, Thierry Berger, and Trentesaux, D., 2013. The Control of Myopic Behavior in Semi-Heterarchical Production Systems: A Holonic Framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(2), p. 800–817.

Ryu, K., and Mooyoung Jung., 2003. Agent-Based Fractal Architecture and Modelling for Developing Distributed Manufacturing Systems. *International Journal of Production Research*, 41(17), p. 4233–55.

Valckenaers, P., and Van Brussel, H., 2016. Design for the Unexpected: From Holonic Manufacturing Systems Towards A Humane Mechatronics Society-978-0-12-803662-4. *International Journal of Performance Engineering*, 12(3), p. 240.

Valckenaers, P., and Van Brussel, H., 2016. Design for the Unexpected: From Holonic Manufacturing Systems towards a Humane Mechatronics Society. *Butterworth-Heinemann.*

Valckenaers, P., Van Brussel, H., Paul Verstraete, and Bart Saint Germain, 2007. Schedule Execution in Autonomic Manufacturing Execution Systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 26(2), p. 75–84.

Van Brussel, Hendrik, Jo Wyns, Valckenaers, P., Luc Bongaerts, and Patrick Peeters, 1998. Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. *Computers in Industry*, 37(3), p. 255–74.

Wong, T. N., C. W. Leung, K. L. Mak, and R. Y. K. Fung, 2006. Dynamic Shop Floor Scheduling in Multi-Agent Manufacturing Systems. *Expert Systems with Applications,* 31(3), p. 486–94.

Wooldridge, M., 2009. *An Introduction to Multiagent Systems*, John Wiley & Sons.

Wroblewski, M. T., 2019. *What Is a Blue-Collar Worker and a White-Collar Worker*.

Xiong, Wei, and Dongmei Fu, 2018. A New Immune Multi-Agent System for the Flexible Job Shop Scheduling Problem. *Journal of Intelligent Manufacturing,* 29(4), 857–73.

Zambrano, G., Cyrille Pach, Nassima Aissani, Theodore Berger, and Trentesaux, D., 2011. An Approach for Temporal Myopia Reduction in Heterarchical Control Architectures. *In 2011 IEEE international symposium on industrial electronics. IEEE*, p. 1767-72

TOWARDS A PREDICTIVE MAINTENANCE BASED ON ULTRASONIC GUIDED WAVES NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUE: A CASE STUDY

Mohamed Sfar[1,2], Slah Yaacoubi[3], Sofiene Dellagi[2], Mahjoub El Mountassir[3], Sadok Turki[2]

[1] *University of Tunis El Manar, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunis, Tunisia.*
[2] *LGIPM, Université de Lorraine, Metz, France.*
[3] *Equipe Monitoring et Intelligence artificielle, Institut de Soudure, 4 Bvd Henri Becquerel 57970 Yutz France.*

ABSTRACT: *This paper concerns the predictive maintenance (PM), which is in increasing use in many fields. It proposes the use of a non-destructive testing technique, namely ultrasonic guided waves, in order to reinforce the PM of a given installation. To achieve PM, various sensors are required to collect data, which are needed as inputs of predictive models. These sensors are employed to monitor the health (said also in other words degradation) of the installation to be maintained in operation. In this study two models based on EDM-ARIMA and neural network are built and applied on data collected on a tube via the ultrasonic guided waves. Residual useful life of the structure is provided in different cases.*

KEYWORDS: *Predictive maintenance, Ultrasonic Guided Waves, Prognostic, Residual Useful Life, ARIMA, EMD, Neural Network, Non-destructive testing.*

1 INTRODUCTION

The rise of digitalization and industry 4.0 promises an optimization of industrial production based on data. Numerous players in industrial analytics guarantee to effectively tackle issues just by gathering and analyzing data. Lately, more and more data is acquired and more and more analytical tools become available [1].

Nowadays, mastering the operation of industrial systems represents a big challenge for maintenance operators, since these systems are more and more complex with technological development. Therefore, many companies are now implementing predictive maintenance strategies which is a proactive approach that aims to anticipate faults and breakdowns of an industrial system, based on monitoring modules, diagnosis, prognosis and decision support in the form of an intervention calendar.

In terms of predictive maintenance, the last stage of the Structural Health Monitoring (SHM) process, which is the prognostics, is used to anticipate the evolution of the defect or degradation in the future. A SHM system is defined as an integrated part of the structure to be monitored and should ideally be able to detect, locate and evaluate damage in the structure, estimate its severity and monitor its evolution with time. The utilization of SHM will result in (i) diminished basic load by changing design principles; (ii) decreased maintenance expenses; and (iii) expanded accessibility, however it is recognized at the same time that SHM technologies will be presented only if they have direct financial advantages. Major design aspects that govern any SHM system are (i) changes of the monitored physical properties due to damage; (ii) transducer–structure interaction to reliably measure the expected changes with the required resolution; and (iii) signal processing and analysis tools to extract the required information on structural integrity [2].

Prognostics essentially attempt to anticipate how much time remains before a fault or failure will happen, giving the current state of the asset. In other words, prognostics are based on predicting the residual useful life (RUL) of a system based on condition monitoring of the asset and subsequent analysis of the information and data collected for a given task occurrence. In many situations, the complexity of the systems observed does not allow to derive robust and precise prognosis models. However, historical data that capture the life signal behavior of measured signals or extracted features from the incipient fault stage to equipment failure are often available. In such cases, data-driven methods that model how such signals and features evolve can be utilized to generate predictions of RUL.

Data collection of physical factors (temperature, vibration, etc.) can be achieved using vibration analysis, thermography etc. [3].

In the present work, data were collected using Ultrasonic Guided Wave (UGW). UGW are mechanical waves, at frequencies over the scope of human perceptible frequencies that propagate along a stretched structure while guided by its limits [4], its use to the field of preventive maintenance is in persistent increment. Today, UGW is assuming a significant economic position, particularly in the fields where the wellbeing of people is of higher significance than financial cost (i.e.: aeronautics, trains ...). They have been generally used to assess the trustworthiness of engineering structures, because they are capable to spread over significant separations and fantastic affectability to the nearness of deformities in the proliferation way [5]. Furthermore, they contain rich information

regarding the mechanical properties along their path of propagation and possess high sensitivity to changes in material and geometric in homogeneities due to damage. UGW is applied as an active as well as passive monitoring techniques [6], where the latter is comparable to an autonomous acoustic emission measurement system. But the majority of GW SHM systems in development use active transducers to excite specific stress wave modes to interrogate the component.
The prognostics rely on the approach of projection methods, which projects the current level of degradation in the future. It's essentially about a time series prediction problem. Many approaches are proposed for time series forecasting like: Artificial Neural Network (ANN), exponential smoothing model (ETS), Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA), machine learning, Support vector Regression (SVR), etc. [7, 8, 9, 10].

In this study, we focus on two approaches. The first one is a hybrid approach called Empirical Mode Decomposition-ARIMA (EMD-ARIMA), since EMD is suitable for nonlinear non-stationary data [11, 12]. EMD is used to decompose the original data into components in order to reduce the difficulty to realize the high-precision predictions, and ARIMA predicts components respectively [13]. The second one is a statistical approach, mainly used in machine learning, called Auto-Regressive Neural Networks (ARNNET). Its concept is inspired from the biological neural network of the central nervous system. Neural Networks are better used to estimate functions based on a huge volume of training data. These are capable of modelling complex and non-linear functions [23].

The remainder of the paper is organized as follows. The next section provides some basic theoretical aspects of EMD-ARIMA and ARNNET. Section 3 describes the datasets used in the study and discusses the methodology used in the time series modeling and forecasting. The results obtained in this study are presented in section 4.

2 MATHEMATICAL MODEL

2.1 EMD-ARIMA Models

In this section we will discuss a hybrid EMD-ARIMA method of prediction. The computational framework of this method is given in Figure 1. As shown in Figure 1, the method consists in: (a) using the EMD to decompose the original time data into components with different features (sub-layers); (b) applying ARIMA models to each sub-layer and adopt the built models to forecast and (c) summarize the predictions of the sub-layers to get the final prediction for the original data [13].

2.1.1 EMD

EMD is an adaptive time series decomposition technique based on Hilbert-Huang transformation (HHT), which is suitable for nonlinear non-stationary data [11]. EMD can decompose the original data into a series of components with different frequencies, namely, intrinsic mode function (IMF) [12] using the equation as follows:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{n} C_i(t) + R(t) \qquad (1)$$

Where$\{C_i(t)\}$, (i=1...n) is the IMFs in different decompositions, {R (t)} is the residue and n is the number of IMF's. The computational steps of the EMD are given as follows:

Step 1: Identify all the local extrema (maxima and minima) of series {X (t)}.
Step 2: Connect all the local maxima by a cubic spline to generate its upper envelop $\{X_{up}(t)\}$, and all the local minima to obtain the lower envelop $\{X_{low}(t)\}$.
Step 3: Calculate the mean envelop {M(t)} as follows:

$$M(t) = \frac{[X_{up}(t) + X_{low}(t)]}{2} \qquad (2)$$

Step 4: Extract the details as follows:

$$Z(t) = X(t) - M(t) \qquad (3)$$

Step 5: Check whether {Z(t)} is an IMF: (a) if it is then set C(t)=Z(t) and set X(t)= R(t)= X(t) - C(t) ; (b) if not, replace {X(t)} with {Z(t)} then repeat the steps 2-4 until the termination criterion is satisfied. The equation of the termination condition can be represented as follows:

$$\sum_{t=1}^{m} \frac{[Z_{j-1}(t) - Z_j(t)]^2}{[Z_{j-1}(t)]^2} \leq \boldsymbol{\delta} \qquad (4)$$

(j=1, 2..., t=1,2,…,m)
Where "m" is the number of the data points, "$\boldsymbol{\delta}$" is the terminated parameter, and "j" is the time of iterative calculation.
Step 6: Repeat steps 1-5 until all IMFs are found [13].

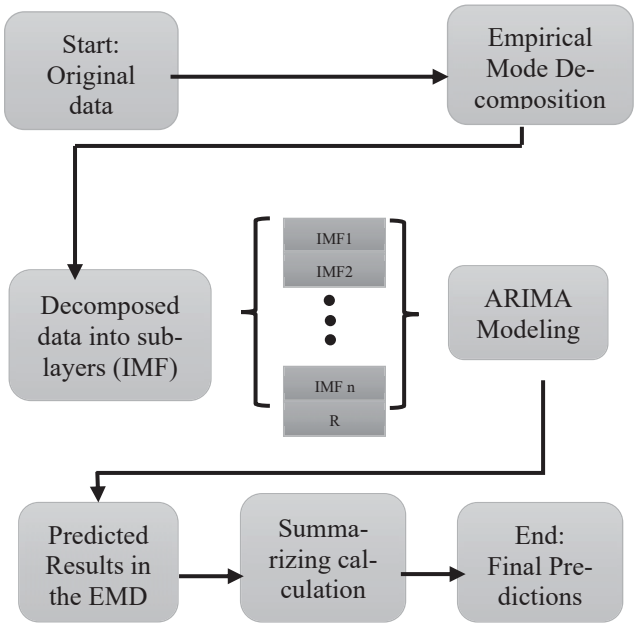


Figure 1. Framework of EMD-ARIMA models.

2.1.2 ARIMA

Once all IMFs are found, we apply ARIMA model to each IMF to fit the time series. An ARIMA model uses auto-regressive moving average (ARMA) model to fit stationary time series. When the time series are non-stationary, they must be converted into stationary series by difference transformation before using ARMA for modeling. This is what "I" in ARIMA refers to; integrated. The difference transformation can be divided into the order difference transformation and the periodic difference transformation. The first-order difference transformation is:

$$\nabla Y_t = Y_t - Y_{t-1} = (1 - B)Y_t \qquad (5)$$

where, ∇ is the difference operator, Y_i value, B is the back-shift operator.
Occasionally, the differenced data won't appear to be stationary and it is necessary to difference the data a second time to obtain a stationary series, and the second-order difference transformation is:

$$\nabla^2 Y_t = \nabla Y_t - \nabla Y_{t-1} = Y_t - 2Y_{t-1} + Y_{t-2} \qquad (6)$$

The periodic difference transformation is as follow:

$$\nabla_s Y_t = Y_t - Y_{t-s} \qquad (7)$$

where, ∇_s is the periodic difference operator and s is the number of periods.

When the differentiated series is stationary, we can use ARIMA model and it can be formulated as follows [14]:

$$\varphi(B)(1 - B)^d Y_t = \theta(B)e_t \qquad (8)$$

Where, $\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \cdots - \varphi_p B^p$, $\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \cdots - \theta_q B^q$, φ_i(i=1..p) and θ_i(i=1..q) are the model parameters that are estimated using the autocorrelation function (ACF) and the partial autocorrelation function (PACF); a_t is the error; p and q are the autoregressive and the moving average order, respectively and d is the order of differentiation [15].

2.2 Auto-Regressive Neural Networks

In this section we will introduce the Auto-Regressive Neural Network model. It is a network of multiple nodes working in parallel as shown in Figure 2. The inputs are combined through a linear function defined by :

$$z_j = g\left(\sum_i y_i w_{ij} - \beta_j\right) \qquad (9)$$

Where z_j is the output of the j[th] node, y_i is the i[th] input, β_j is the bias of the j[th] node, w_{ij} is the i[th] weight in the j[th] node.
The result of the combination is then passed through the non-linear sigmoid activation function g() which transforms the input to the node to an output which in turn acts as an input for the nodes in the next layer. The activation function is given by [16, 17] :

$$g(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \qquad (10)$$

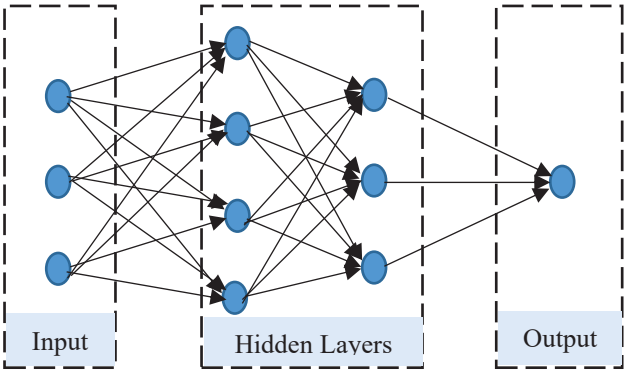


Figure 2. Neural Network architecture of three input nodes, two hidden layers and one node output layer.

3 DATA SET AND METHODOLOGY

3.1 Data set

Our study aims to predict the RUL of tubular structures in order to schedule predictive maintenance, so we are brought to predict the evolution of the degradation indicator (DI) over time. The datasets used in this study are two time series of the degradation indicator for two mode of propagation of UGW in pipes which are torsional and flexural. The dataset contains 1059 observations for each the torsional and flexural modes. This degradation indicator was established over the collected UGW signals basing on singular value decomposition of the matrix of reference signals acquired from the pipe. The time series' plot of the datasets is shown in Figure 3.

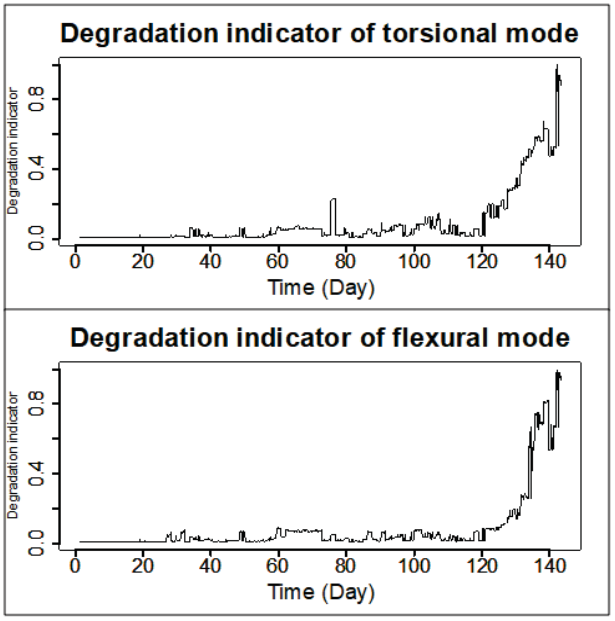


Figure 3. Degradation indicator for torsional and flexural mode. Each signal is normalized by its maxima.

3.2 Methodology

3.2.1 EMD-ARIMA

Mainly, ARIMA's forecasting task is selecting the appropriate model order, which is the value of p, d and q. In this study, the following steps are used to identify the model used for the prediction:
Step 1: As explained in section 2, we adopt the Empirical Mode Decomposition (EMD) to decompose the degradation indicator samples into Intrinsic Mode Functions (IMFs). Figure 4 is an example of data decomposition into IMFs.

Step 2: In the step of model identification, all of the decomposed degradation indicator has their stationarity checked to decide the "d" value in ARIMA (p, d, q). If an IMF has been found non-stationary, a difference will be executed for this IMF. In this study, in order to check the stationarity of time series we compare the p-values of the series by applying the Augmented Dickey Fuller test (ADF Test). If the p-value, using the function is lower than 0.05, means the time series is stationary and vice versa [18, 19].

Step 3: We compute and examine the Autocorrelation function (ACF) and partial autocorrelation function (PACF) of each IMF to decide whether to include an Auto-Regressive (AR) component or Mobile Average (MA) one or both [20].

Step 4: In order to obtain the model and predict the data for each IMF, we split the data into two parts, which are training data and validation data. For the torsional mode, we consider the first 910 data as training data. The remaining data is used as validation data. On the other side, for the flexural mode, we consider the first 950 data as training data and the other 109 data as validation data. For prediction accuracy, the Root Mean Squared Error (RMSE) is introduced to appraise and compare the different simulation results. The RMSE is calculated using the following equation.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_{n+i} - \hat{x}_n(i))^2}{N}} \qquad (11)$$

Where N denotes the length of the validation data, x_{n+i} denotes the i-th actual value of validation data, $\hat{x}_n(i)$ denotes the i-th forecast. It is worth noting that, p, q and d may be also selected via an information criterion such as the Akaike information criterion (AIC) calculated as follow [21]:

$$AIC = -2\log(L) + 2k \qquad (12)$$

Where L is the likelihood of the model and k is the total number of parameters and initial states that have been estimated. This criterion is used to measure the goodness of fit and determine the choice of optimal lags in the model. A negative value of AIC means that the model is well built [22].

Step 5: Once the model is chosen for each IMF, we sum all the forecasted data using ARIMA and compare it to the actual values of the validation data.
Step 6: We set a threshold of the degradation indicator and determine at what time the forecasted values reach it.

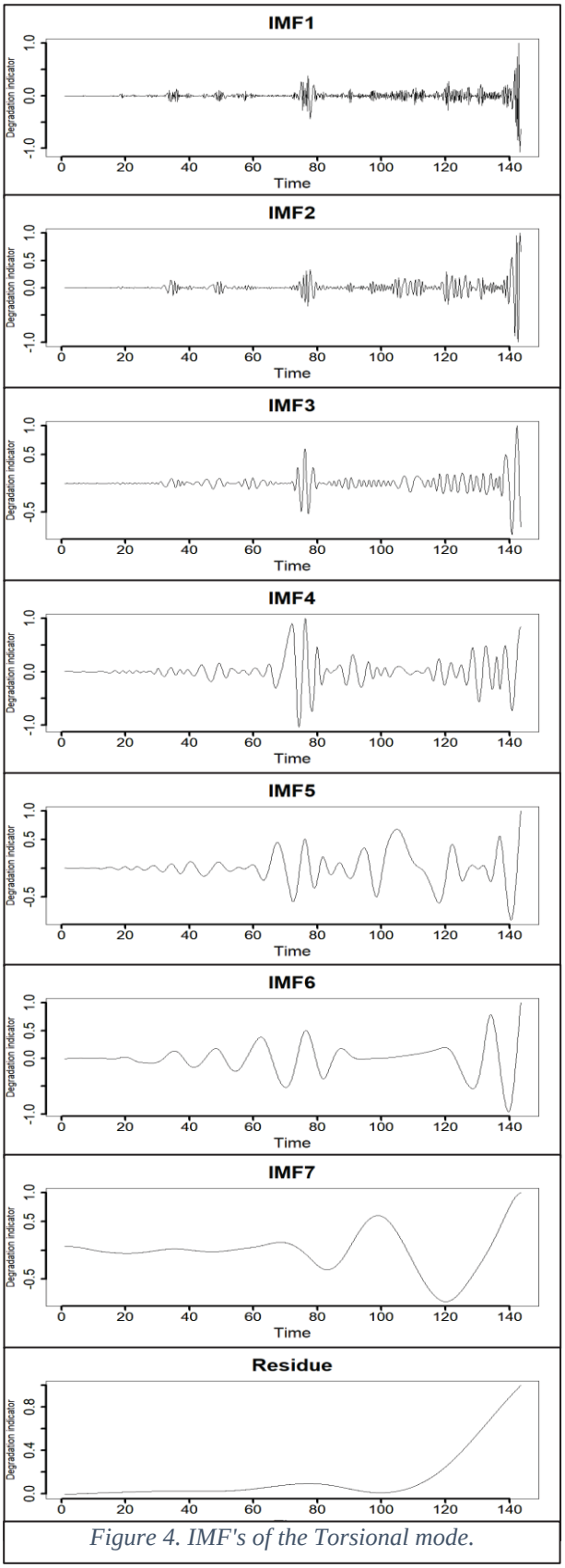


Figure 4. IMF's of the Torsional mode.

3.2.2 ARNNET

The effective execution of a Neural Network is reliant on proper training of the network with large training sets. In the process of training, the algorithm learns to adjust the weights and bias associated with each connection. In this paper we consider the notation NNAR (p, k) to indicate that in the model there are p lagged inputs and k nodes in the hidden layer [23-24]. The steps followed to build the neural network model are the following:
Step 1: Determine the order of auto-regression (p) for the dataset. In Figure 5, PACF plot is drawn for the dataset. The abscissa represents the lags and the ordinate represents the partial autocorrelation values for the corresponding lags. We search for the last signifiant spike. In our case, the value of p is 19 and 25 consecutively for Torsional and Flexural data.

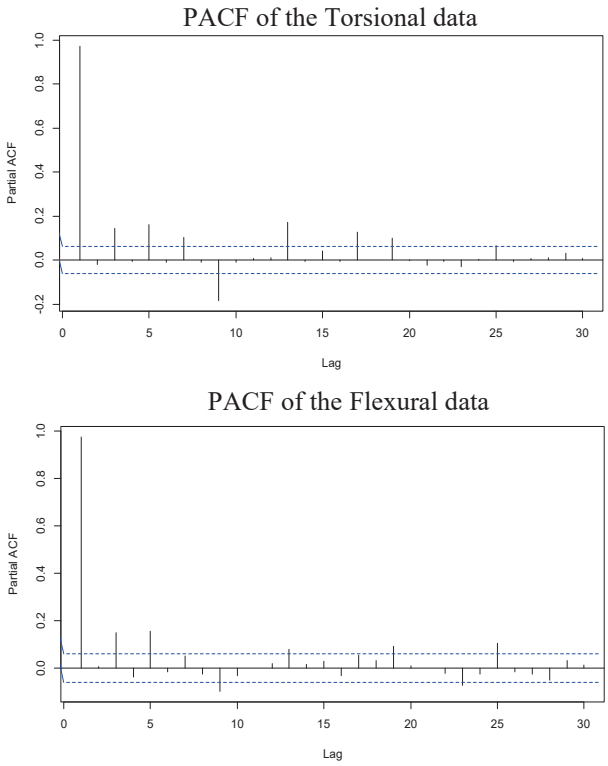


Figure 5. PACF of the Torsional and Flexural data.

Step 2: Data has been partitioned into training and validation data. We used the same partition as the one used for EMD-ARIMA method.

Step 3: Build the ARNNET of the data using the function "nnetar" in R.
Step 4: We set a threshold of the degradation indicator and determine at what time the forecasted values reach it.

4 RESULTS AND DISCUSSION

The results of the EMD of the original degradation indicator for the torsional mode is given in Figure 4. From Figure 4, it can be seen that the time series have been converted successfully seven IMFs and a residue for the torsional mode. Concerning the flexural mode, the time series was decomposed into eight IMFs and a residue.

The accuracy of some of the estimated results of the tested ARIMA models applied for each IMF prediction as well as their AIC is given in Table 1 and 2. The model with minimum AIC is often the best model for forecasting.

	ARIMA (p, d, q) tested	RMSE	AIC
IMF1	(3, 1, 5)	0.1648	-3354.84
	(2, 1, 4)	0.1652	-3318.13
IMF2	(5, 0, 3)	0.2045	-6185.22
	(4, 0, 4)	0.2044	-6181.75
	(3, 0, 2)	0.2046	-6124.40
IMF3	(4, 0, 3)	0.1024	-11171.84
	(2, 0, 3)	0.1053	-11034.45
	(5, 0, 3)	0.1026	-11138.53
IMF4	(1, 0, 0)	0.153	-6404.08
	(1, 0, 1)	0.1529	-7832.49
IMF5	(0, 0, 0)	0.2122	-2610.2
IMF6	(0, 0, 0)	0.1546	-2820.86
	(0, 0, 1)	0.1537	-4272.69
	(0, 0, 2)	0.1529	-5718.21
IMF7	(0, 0, 0)	0.1741	-2200.24
	(0, 0, 1)	0.1734	-3654.94
IMF8	(0, 2, 0)	0.0878	-18515.45
	(0, 2, 1)	0.086	-19971.26
	(1, 2, 3)	0.06364	-29918
Residue	(0, 2, 0)	0.0108	-19635.96
	(0, 2, 1)	0.0103	-21090.74
	(0, 2, 2)	0.01	-22538.74

Table1. Accuracies and AIC of some tested models for the flexural mode.

	ARIMA(p, d, q) tested	RMSE	AIC
IMF1	(5,0,1)	0.4753	-415.88
	(5,0,4)	0.4748	-420.67
	(5,0,3)	0.4757	-413.04
IMF2	(4,0,1)	0.7661	-2974.21
	(4,0,4)	0.7644	-2999.13
	(5,0,2)	0.7655	-2973.64
IMF3	(1,0,0)	0.5028	-2594.40
	(2,0,0)	0.4659	-6076.33
	(1,0,1)	0.5032	-3993.48
IMF4	(1,0,0)	0.2522	-4287.03
	(3,0,0)	0.2374	-11253
	(2,0,0)	0.2487	-8699.57
IMF5	(0,0,0)	0.3147	-194.4
	(1,0,0)	0.3706	-5052.21
IMF6	(0,0,0)	0.3767	-631.25
	(1,0,0)	0.3706	-6033.87
IMF7	(0,2,0)	0.4358	-15537
Residue	(0,2,0)	8e-10	-16829

Table 2. Accuracies and AIC of some tested models for the torsional mode.

The accuracy of the estimated results of the chosen ARIMA model applied for each IMF for both torsional and flexural mode is highlighted also in Table 1 and 2.
For the torsional mode, if the original data is not decomposed and we apply ARIMA models, the suitable model turns out to be ARIMA (4, 1, 2) with AIC= 545.62 and RMS= 3.17. For our data, the RMSE value using EMD-ARIMA is equal to 1.26, which is 60% lower than the RMSE given by applying ARIMA directly.
Same as the flexural mode, if we apply ARIMA directly without decomposing the data, the suitable ARIMA model is ARIMA (4, 2, 2) with AIC=-2255.66 and RMS= 1.21. For our data, the RMSE value using EMD-ARIMA is equal to 0.514, which is 57.5% lower than the RMSE given by applying ARIMA directly. This result shows that EMD-ARIMA is better than ARIMA which is not surprising since it decreases the forecast difficulty by treating each IMF at once.

Producing estimates of confidence interval is also an important aspect. We also evaluated the performance of the different ARIMA models in producing forecast intervals. Table 3 and 4 shows the confidence intervals at 95% of some of the tested ARIMA models comparing to the actual values. From table 3, we can note that the suitable ARIMA model for the torsional mode comes generally with the tighter confidence interval. However, from Table 4, we can note that the suitable ARIMA model for the flexural mode comes generally with the larger confidence interval.

	ARIMA	Confidence interval	
	(p, d, q)	Lower	Upper
IMF1	(5,0,1)	-0.04154	0.11242
	(5,0,4)	-0.04677	0.107095
	(5,0,3)	-0.04007	0.114003
IMF2	(4,0,1)	-0.17893	0.068152
	(4,0,4)	-0.16497	0.08301
	(5,0,2)	-0.16589	0.08245
IMF3	(1,0,0)	-0.10084	0.06239
	(2,0,0)	-0.09453	0.05671
	(1,0,1)	-0.10925	0.05398
IMF4	(1,0,0)	-0.08257	-0.00178
	(3,0,0)	-0.03191	0.0452
	(2,0,0)	-0.0419	0.0389
IMF5	(0,0,0)	0.00066	0.10155
	(1,0,0)	0.15285	0.25356
IMF6	(0,0,0)	0.04237	0.16025
	(1,0,0)	0.01697	0.13482
IMF7	(0,2,0)	-0.38933	-0.3034
Residue	(0,2,0)	-0.29946	-0.2391

Table 3. Confidence intervals for the torsional mode.

	ARIMA	Confidence interval	
	(p, d, q)	Lower	Upper
IMF1	(3, 1, 5)	0.00066	0.06237
	(2, 1, 4)	-0.0033	0.0583
IMF2	(5, 0, 3)	-0.0559	0.02183
	(4, 0, 4)	-0.0551	0.02261
	(3, 0, 2)	-0.0551	0.02263
IMF3	(4, 0, 3)	-0.0125	0.02645
	(2, 0, 3)	-0.0132	0.02684
	(5, 0, 3)	-0.0126	0.02641
IMF4	(1, 0, 0)	-0.0366	0.0217
	(1, 0, 1)	-0.0366	0.0217
IMF5	(0, 0, 0)	-0.012	0.0682
IMF6	(0, 0, 0)	-0.0374	0.0215
	(0, 0, 1)	-0.0382	0.0203
	(0, 0, 2)	-0.0374	0.0215
IMF7	(0, 0, 0)	-0.121	-0.0648
	(0, 0, 1)	-0.3	-0.244
IMF8	(0, 2, 0)	-0.0801	-0.06
	(0, 2, 1)	-0.0784	-0.0586
	(1, 2, 3)	0.033	0.051
Residue	(0, 2, 0)	-0.0102	-0.008
	(0, 2, 1)	-0.0097	-0.00753
	(0, 2, 2)	-0.0102	-0.00803

Table 4. Confidence Intervals for the flexural mode.

As mentioned in section 3.2, the last step is to fix a threshold of the degradation indicator and see when it is reached. In our case, the threshold is fixed to the highest value reached by the original data, which is 1.1387e-13 for the torsional mode, and 3.037e-14 for the flexural mode. According to the forecasted results using the chosen model, these values are reached at day 157 for the torsional mode and the day 147 for the flexural mode, from the start of the test. Based on the original data, the actual value should be 141 days for both modes. We note that there is a 16- and 6-days gap consecutively for the torsional and flexural mode. In Figure 6 and 7, the original curve is represented in black, the curve in light blue represents the forecasted data with the chosen model. The dark blue and the green curve are simultaneously the prediction of one of the tested models and the prediction using directly ARIMA on the original data.

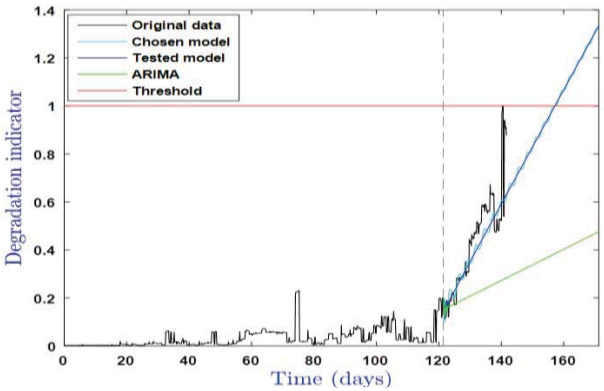


Figure 6. Examples of forecasted data for torsional mode. Normalized by the maxima of the original data.

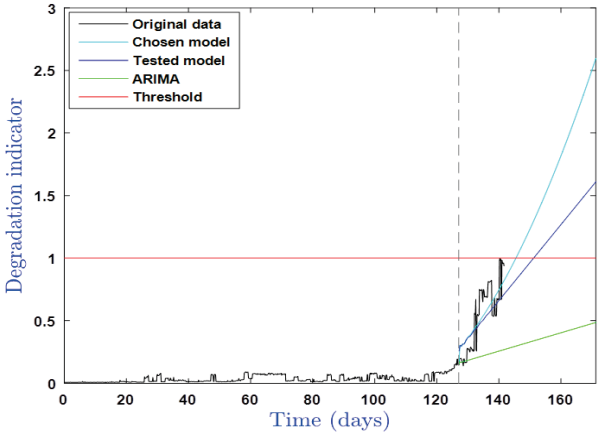


Figure 7. Examples of forecasted data for flexural mode. Normalized by the maxima of the original data.

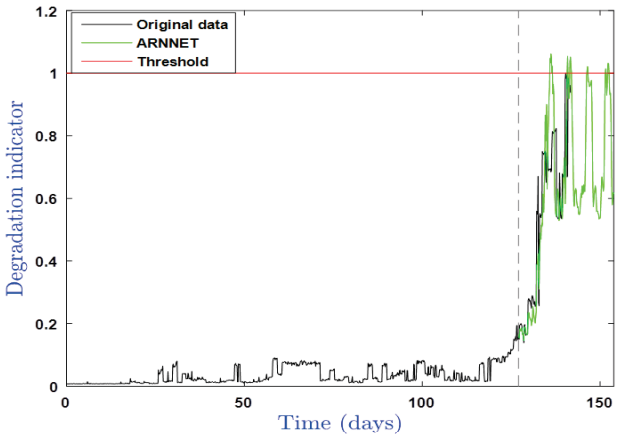


Figure 8. Forecasted data of the Flexural mode using ARNNET.

For the same threshold, we adopt the ARNNET to predict the RUL. According to the forecasted results, this value is reached at day 137 for the Flexural mode which is 4 days before the actual value. However, the forecasted values of the Torsional data didn't reach the threshold.

The RMSE of the forecasted data is 0.11 and 0.148 consecutively for Torsional and Flexural mode.

In Figure 8 and 9, the original curve is represented in black and the curve in green represents the forecasted data using ARNNET method.

The tables 5 and 6 summarize the values of the residual life as well as the RUL found in this research for both torsional and flexural mode. We can conclude that EMD-ARIMA provides better results than ARIMA for both modes.

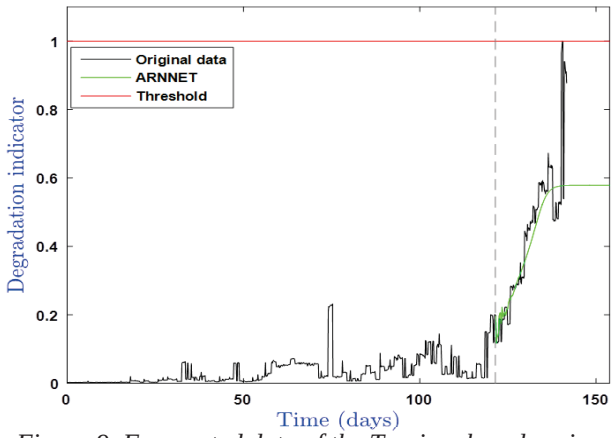


Figure 9. Forecasted data of the Torsional mode using ARNNET.

Flexural mode	Actual Value	Chosen EMD-ARIMA	Tested EMD-ARIMA	ARIMA (4,2,2)	NNETAR
RMSE		0.126	0.16	0.317	0.11
RUL	141	147	152	ϕ	ϕ

Table 5. Residual life and RMSE for the torsional mode.

Torsional mode	Actual value	Chosen EMD-ARIMA	Tested EMD-ARIMA	ARIMA (4,1,2)	NNETAR
RMSE		0.514	0.73	1.21	0.148
RUL	141	157	157	ϕ	137

Table 6. Residual life and RMSE for the flexural mode.

CONCLUSION

Accurate residual useful life forecasting can have a great impact on risk management and predictive maintenance. The purpose of this work is to adopt and compare two methods of time series prediction. The EMD-ARIMA and the ARNNET model were used to predict the residual useful life of tubular products and test its accuracy. The data provided in this study are the evolution of the degradation indicator of a torsional and flexural mode over time. How to effectively model these series and how to improve the quality of forecasts are the outstanding questions.

As one of the most popular forecasting methods, ARIMA turns out to be less effective than the hybrid method EMD-ARIMA. EMD-ARIMA decomposes the time series into IMFs and treats each IMF independently in order to reduce the forecasting complexity.

The hybrid method forecast is able to follow the pattern of the real data better than the ARIMA model but with a certain gap. It shows that the hybrid methodology could significantly increase the forecast accuracy.

The ARNNET is computationally more intensive than the EMD-ARIMA as it has to estimate the weight and bias corresponding to each node, to come up with better results only for the Flexural mode. However, the ARNNET did fit a good model to the torsional data.

REFERENCES

[1] Domingo Llorente Rivera, Markus R.Scholz, Michael Frischer, Markus Krauss Schilling. *Towards a Predictive Maintenance Maintenance System of a Hydraulic Pump. IFAC PapersOnline 51-11. 2018, pp. 447-452.*

[2] M. VEIDT and C. K. LIEW, *Non-destructive evaluation (NDE) of aerospace composites: structural health monitoring of aerospace structures using guided wave ultrasonics.* Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 449-479.

[3] Diego Galar, Uday Kumar. Essential Electronic Tools Efficiency. eMaintenance. 2017, 311-370.

[4] Slah Yaacoubi, Lynda Chehami, Marwen Aouini and Nico F. Declercq, *Ultrasonic guided waves for reinforced plastics safety. Reinforced Plastics, Volume 61. 2017, pp. 87-91.*

[5] B. Zhang, X.C. Sun, M.J. Eaton, R. Marks, A. Clarke, C.A. Featherston, L.F. Kawashita, S.R. Hallett, *An integrated numerical model for investigating guided waves in impact-damaged composite laminates. Composite Structures, Volume 176. 15 September 2017, pp. 945-960.*

[6] Croxford, AJ, Wilcox, PD, Drinkwater, BW & Konstantinidis, G 2007, *'Strategies for Guided-wave Structural Health Monitoring', Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 463, pp. 2961–2981.*

[7] Hongzhan NIE, Guohui LIU, Xiaoman LIU, Yong WANG. *Hybrid of ARIMA and SVMs for Short-Term Load Forecasting. Energy Procedia 16. 2012, pp. 1455-1460.*

[8] Novri Suhermi, Suhartono, Dedy Dwi Prastyo, Ba haruddin Ali. *Roll motion prediction using a hybrid deep learning and ARIMA model. Procedia Computer Science 144. 2018, pp. 251-258.*

[9] Shivam Bhardwaj, E.Chandrasekhar, Priyanka Padiyar, Vikram M.Gadre. *A comparative study of wavelet-based ANN and classical techniques for geophysical time-series forecasting. Computers & Geosciences, Volume 138, 2020.*

[10] SibaramaPanigrahi, H.S.Behera. *A hybrid ETS–ANN model for time series forecasting. Engineering Applications of artificial Intelligence. Volume 66, November 2017, pages 49-59.*

[11] Huang N E, Shen Z, Long S R.(1998), *"The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis." The Royal Society 454. 1998, pp. 903-995.*

[12] Qianqian Feng, Jun Wang, Xiaolei Sun, *Country risk forecasting based on EMD and ELM: evidence from BRICS countries. Procedia Computer Science 139. 2018, pp.71-75.*

[13] Hui Liu, Hong-qiTian, Yan-feiLi, *An EMD-recursive ARIMA method to predict wind speed for railway strong wind warning system. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 141. 2015, pp. 27-38.*

[14] Margaratha Ohyver, Herena Pudjihastuti, *ARIMA Model for forecasting the Price of Medium Quality Rice to Anticipate Price Fluctuations. Procedia Computer Science 135. 2018: 707-711.*

[15] Hongzhan NIE, Guohui LIU, Xiaoman LIU, Yong WANG. *Hybrid of ARIMA and SVMs for Short-Term Load Forecasting. Energy Procedia, Volume 16, Part C. 2012, pp. 1455-1460.*

[16] Akhter Mohiuddin Rather, *A prediction-based approach for stock returns using autoregressive neural networks. World Congress on Information and Communication Technologies, 2011, pp. 1271-1275.*

[17] Oskar J.Triebe, Nikolay Laptev, Ram Rajagopal, *AR-Net: A SIMPLE AUTO-REGRESSIVE NEURAL NETWORK FOR TIME-SERIES. A Present, December 2, 2019.*

[18] Bahareh Fanoodia, Behnam Malmirb, Farzad Firouzi Jahantigha. *Reducing demand uncertainty in the platelet supply chain through artificial neural networks and ARIMA models. Computers in Biology and Medicine 113. 2019, 103415.*

[19] Jae H. Kim, In Choi. *Unit Roots in Economic and Financial Time Series: A Re-Evaluation at the Decision-Based Significance Levels. Econometrics. 2017, 5, 41.*

[20] Zhirui He, Hongbing Tao. *Epidemiology and ARIMA model of positive-rate of influenza viruses among children in Wuhan, China: A nine-year retrospective study. International Journal of Infectious Diseases 74. 2018, pp. 61-70.*

[21] P. Ramos, Nicolau Santos, Rui Rebelo. *Performance of state space and ARIMA models for consumer retail sales forecasting. August 2015, pp.151-163.*

[22] P.C. Young. *Recursive Estimation and Time Series Analysis: an Introduction, Springer-Verlag. International Journal Of Forecasting, Volume 31. 2012, pp 91-92.*

[23] Debasish Sena and Naresh K. Nagwani, *A NEURAL NETWORK AUTOREGRESSION MODEL TO FORECAST PER CAPITA DISPOSABLE INCOME, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol 11, No 22, November 2016, pp 13123-13128.*

13^{th} *International Conference on Modeling, Optimization and Simuation* - MOSIM*'20 - November 12-14, 2020*
Agadir - Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

Adopting a model-based approach for satellite operations' diagnosis

N. CHRISTOFI

LAAS-CNRS, IRT Saint Exupéry
INSA Toulouse, Université de Toulouse
nikolena.christofi@irt-saintexupery.com

C. BARON

LAAS-CNRS, ISAE-Supaéro, Quartz-Supméca
CNRS, INSA Toulouse, Université de Toulouse
claude.baron@laas.fr

X. PUCEL

Information Processing & Systems
ONERA, Toulouse, France
xavier.pucel@onera.fr

M. PANTEL

IRIT, Toulouse INP
Université de Toulouse, France
marc.pantel@toulouse-inp.fr

M. MACHIN

IRT Saint Exupéry
APSYS-AIRBUS, Toulouse, France
mathilde.machin@irt-saintexupery.com

C. DUCAMP

Airbus Defence & Space
Toulouse, France
christophe.ducamp@airbus.com

ABSTRACT: *The diagnosis procedure in satellite operations is constrained by strict time limits. If a failure occurs, operators must be efficient and proactive, as diagnosis must be completed within the smallest number of visibility windows (pass duration over the ground station which are usually very short and separated by long periods where the ground cannot communicate with the satellite). Improving the diagnosis procedure and tools, time and precision-wise, is therefore essential. The proposal presented in this position paper is to provide the operators with operation-dedicated models to help them in reacting quickly and in finding a suitable repair solution as fast as possible. These models will gather system architecture, functional and dysfunctional data taken from system engineering and safety analysis models. The paper presents the framework of the proposed solution and discusses different implementation options.*

KEYWORDS: *MBSE, MBSA, operations, system engineering, safety, space systems, satellites, model-based engineering, operational diagnosis.*

1 INTRODUCTION

Carrying out mission-assigned activities in satellite operations imposes strict time limits, as the satellites' availability depends on their position with respect to the ground station, which also defines their visibility window, i.e the duration (also called time "window") during which the satellite can send and receive messages to and from the ground station. In the case of alarms occurrence which cannot be handled onboard, on-ground operators need to quickly react during the satellite passage since they need to identify whether it is indeed an error, and if so, to find the root cause and correct it, within the limited time-frame of the current and following visibility window(s). Waiting for the next window(s) increases the mission costs and risks, since the satellite issue can worsen. Current practices provide a good level of safety performance in operations but a lack of availability, i.e. the worsening is limited but the cost can rise significantly. Thus, availability, which is described as the capability "to keep [the system in] a functioning state in the given environment" [Cloutier, 2019], [INCOSE, 2012], is a very important system feature, especially for the clients -the recipients of the service provided by the satellite.

The communication between the satellite and the operation centres is bounded by strict time constraints. For example for Earth-observation satellites placed in Sun-Synchronous Orbits (SSO), with an altitude typically between 600 and 1000 km over the Earth

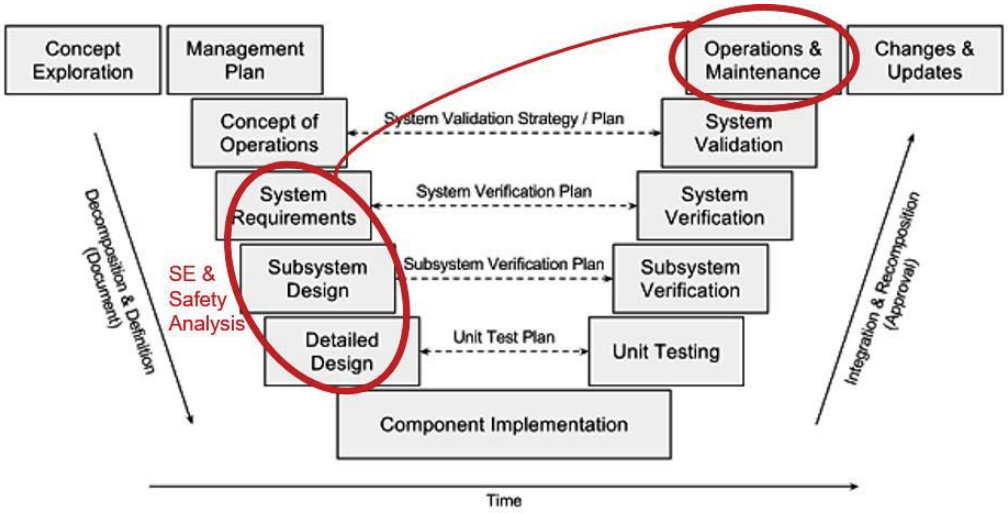


Figure 1 – Positioning the operational phase in the system engineering life-cycle [Esfahbod, 2013].

surface, the visibility window lasts between 8 and 15 minutes. This is because they only pass over the same point on the ground at the same time in a fixed period [Takashi, 2000]. Improving the diagnosis procedure and the associated tools for operators is therefore an essential and challenging task, especially in regards to system availability.

The operators' mission tasks require multidisciplinary knowledge and background in -among other disciplines- systems engineering, dependability and diagnosis. They need to be able to characterise failures arising from alarms and associated data, which are raised at system, subsystem or equipment level, and to find the root causes that initiated the fault chain. In addition, operators need to propose a repair sequence to fix the issue or reduce its impact. Even though they undergo a thorough training aiming to prepare them for their tasks, fully mastering all disciplines involved in a space system is hard to achieve, so they often need to communicate with other experts during diagnosis and repair designs.

In some cases, a major issue was identified: operators mostly relied on their experience and not on formalised nor capitalised information concerning the system structure and behavior and the possible failure causes. In an effort to support efficient diagnosis, we propose to provide them with *models*, to help them in quickly and precisely identify the causes of the alarms reported by the system, and, in the case of failures, to design appropriate repair procedures. This paper therefore advocates the use of model-based approaches where the system models, together with the safety-related dysfunctional model, would contribute in building an operation model to support the operators in performing diagnosis.

This paper is a position paper, and is organised as follows. First the context and problem are introduced and the interests of using model-based approaches is being discussed. We then present a first draft of our model-based approach in order to improve operational diagnosis. We conclude and present several research perspectives aiming at deepening the proposal or considering alternative solutions.

2 CONTEXT AND MOTIVATIONS

The common practice today in operational diagnosis is that the operators are given a semi-formal description of a system (e.g. structured documents written in natural language), together with an observation of the system's behaviour which conflicts with the way the system is meant to behave. Diagnosis is part of the operational phase, which is one of the last phases in a satellite life-cycle, as can been seen on figure 1. The traditional system life-cycle sequentially first consists in the system development: its decomposition into subsystems, the development of each subsystem, and the integration of the subsystems that allows delivering and deploying the system. Then, the (usually) combined operation and maintenance phase begins.

2.1 Diagnosis in space operations

Space systems are composed of on-board parts (platform and payload), and on-ground parts, both of which contain instrumentation and tests that are useful for fault diagnosis. Each payload and platform (power and thermal management, attitude and orbit control subsystem (AOCS), communication, on-board processing & storage i.e. on-board computer (OBC), structural and, telemetry & telecommand (TM/TC)) subsystem has specific diagnosis modules either crafted manually, or according to existing model-based or data-based approaches. Each diagno-

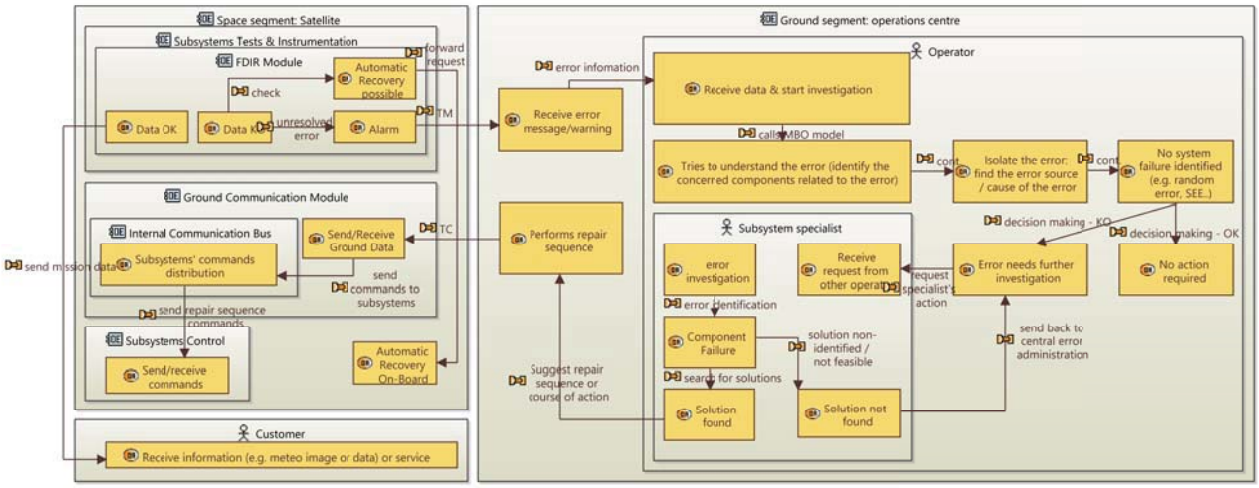


Figure 2 – Graphical representation of the operational diagnosis procedure.

sis module can identify abnormal situations and emit alarms. Figure 2 shows how these alarms are processed.

The satellite control centres receive the relevant data transmitted at each passage (TM) over the ground stations, and if these include any alarms (i.e. a potentially abnormal situation was observed), the operators start investigating the alarms raised, which may or may not correspond to failures. If not, the data can be processed to be sent to the customer -for our case, Earth-observation units. When looking for the cause of the alarms, the operators first exclude any subsystems and their components not related to the alarms and limit the search field of the possible alarm sources. The sources can be multiple as alarms can gather data coming from different parts of the satellite. When analysing the alarms in detail, the goal of the operators is to identify the real components in failure and restore the nominal configuration as close as possible (using nominal components rather than redundant ones). However the operators might sometimes find that the alarms have been raised simply as a warning, or that their cause was errors that have no impact on the system and that require immediate intervention, or that they simply resulted from a Single Event Effect (SEE, effect of a cosmic ray or particle), etc. In the latter case, the operators usually take no action (apart from logging the alarms).

After confirming the identification of the error, the operators and/or specialists need to suggest possible repair sequences and courses of action to be followed on board the satellite, through the control centres and the communication modules on earth and in space during the current or the next visibility windows. If these ones are not able to resolve the error, they send it back to the error handling centres to be assigned to other teams, with higher level of expertise, or related to other subsystems, as shown in figure 2.

The problem here is that, in worst-case scenarios, and when the satellite was not initially designed to take actions and automatically correct these identified faults i.e. absence of related onboard Failure Detection Isolation and Recovery (FDIR) systems, the above described procedure needs to be performed in very little time. In our case, the duration of the visibility window is a few minutes. More than often, the operators do not manage to analyse the alarms and identify the corresponding errors during this short visibility window, while the experts cannot propose associated repair actions, so they have to wait for the next satellite passage, and sometimes several windows are needed. *Losing several hours of satellite availability can cost a high amount of money.*

2.2 Operational Diagnosis constraints

The limited storage on board the satellite induces more restrictions for diagnosis. The satellite can only save some of the sensors' measurements every cycle, so the operators need to "tell" the satellite which data to record and transmit each time, that may be useful in analysing the alarms. Thus the limited resources and access make diagnosis a more critical process for space systems than for other kind of systems, resulting in high failure costs.

The system-related information which the operators process to assist them in diagnosis, comes from the system development activities performed earlier in the life-cycle, especially system architecture and safety models production (encircled in figure 1). The result of this work are mostly models, which are produced by the system architects and safety analysts, that have a thorough and deep understanding of the system architecture and all of its functions -in a design point of view, i.e., with a limited knowledge of the constraints the operators face in a day-to-day ba-

sis. Thus, these models usually fail to meet all of the operators' needs, since they could lack diagnosis-useful data or may contain too much unrelated information that can lead to confusion and hold back the diagnosis performance.

The analysis of the current practise highlights the need for better diagnosis practices, and especially better assistance provided by data from development phases. We identified several pathways for improvement, that focus either in the system development phase or in the operation and maintenance phase: these two phases being interconnected and inter-influential. The pathway that is considered in this paper consists in improving the diagnosis process by: (a) introducing Model-Based Operations (MBO) models, which can realistically represent the satellite's operational procedures, in alignment with Model-Based Systems Engineering (MBSE) and Model-Based Safety Analysis (MBSA) models of the system; (b) the selection process of the aforementioned models, based on the data communicated by the satellite.

3 MODEL-BASED APPROACHES

As the complexity of systems rapidly increased, the use of model-based approaches has become widely spread in the industry, including the space domain. Among several, they offer two main interests: facilitating the system development and analyses (system design & dysfunctional analysis), as well as supporting the communication and collaboration between the engineering teams from different disciplines and various stakeholders. In particular, models are used in systems engineering to represent requirements, functions, architecture, and in dependability assessment, to analyse whether the system design exhibits weak points.

3.1 Model-Based Systems Engineering

INCOSE[1] defines Model-Based Systems Engineering (MBSE)[2] as "the formalized application of modeling to support system requirements, design, analysis, verification and validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life-cycle phases". MBSE is especially expected to replace the document-centric approach that has been practiced by systems engineers in the past decades and to influence the future practice of systems engineering by being fully integrated into the definition of systems engineering processes [INCOSE, 2020], while enhancing productivity and quality, reducing risk, and providing improved communications among the system development team. These models are formal accounts of the information provided previously in the documents as graphics or natural languages. Their formal nature enables their automatic processing by software tools to conduct automated validation/verification and model/code generation activities both offline and online (models at runtime that we target in our proposal).

3.2 Model-Based Safety Assessment

Model-Based Safety Assessment (MBSA) is a technique which models the system's structure and dysfunctional behavior in order to provide Safety analysis results, but also for Reliability, Availability and Maintainability (RAMS). In space missions, after the satellite has reached its final operational orbit, the focus is on Availability, i.e. the system's capability to be kept in a functioning state in the given environment, and Maintainability, i.e. the system's capability to be timely and easily maintained, including servicing, inspection and check, repair and/or modification.

In order to perform such dysfunctional analysis at system level, it is required to have a fundamental knowledge of (a) the nominal system behavior, limited to the scope and the level of abstraction useful for the dysfunctional analysis, in particular the reconfiguration and protection systems defined in the SE model, and (b) the various ways the failures can occur and propagate inside the system [Machin, 2019]. Consequently, MBSA uses a formal model describing both the nominal system behavior and the possible faulty behaviors, to analyse combinations of faults and their consequences in terms of availability and safety since, when a critical error occurs, the system is not available until the error is resolved.

3.3 Model-Based Diagnosis

Model-based Diagnosis is part of a larger task described in [Schwabacher, 2007] as Integrated System Health Management (ISHM), that includes both fault diagnosis and prognosis. The range of techniques used for system health management is represented in figure 3.

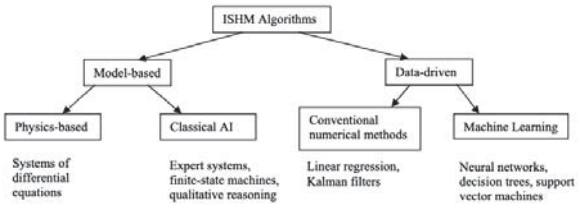


Figure 3 – Taxonomy of ISHM algorithms [Schwabacher].

[1] www.incose.org/
[2] www.omgwiki.org/MBSE/doku.php

Diagnosis can also be decomposed in several stages [Travé, 2006]: (a) **fault detection**, which aims at discriminating normal system states from abnormal ones, i.e. states which result from the presence of a fault; (b) **fault isolation**, also called **fault localisation**, whose goal is to point at the faulty components in the system; (c) **fault identification**, whose output is the kind of fault and possibly the models of the system related to this fault. These tasks are usually identified by the **FDI** acronym, standing for **Fault Detection** and **Isolation**, and are often extended with a fault **Recovery** task, under the **FDIR** acronym. The more precise diagnosis stages require more precise models or data, which can be difficult to produce and validate.

4 A MODEL-BASED APPROACH TO IMPROVE OPERATIONAL DIAGNOSIS

The paper's proposal aims to support each considered life-cycle step (architecture design, availability analysis and diagnosis in operations) by models, to ensure precision, quickness and traceability in diagnosis. Our goal is to assist the operators in the troubleshooting phase, by providing easy access to the information relevant for diagnosis and repair design. This information will be organised into a Model Based Operation (MBO) model, depicted in figure 4, where the procedure the operator follows to isolate the source cause in using the MBO model is illustrated. Furthermore, we aim at partially automating the diagnosis procedure by providing appropriate computational tools. In order to implement this proposal, we plan to conduct a thorough domain analysis of the operation phase of the system life-cycle: how this phase is currently conducted by operators; what are the Process, Methods and Tools they rely on; and to model these elements. This will lead to a proposal of an ontology/metamodel for the operational phase and its relation with MBSE and MBSA.

In order to build the behavioural models in the design phase, we rely on standard languages, methods and tools, such as the SysML based Cameo Systems Modeller[3]. Regarding the availability analysis and diagnosis models, our purpose is to ensure efficient modeling so as to achieve their respective objectives. The process in which these models are created, updated and distributed amongst the engineering teams, also raises an important issue, related to the productivity of the availability analysis and diagnosis cycles.

4.1 Relationship between different kinds of models

If the same engineer was responsible for performing all steps of the process: system architecture, dysfunctional analysis, and production of the MBO model, all the consistency issues among the different types of models would be considered as solved. In reality however, this is not the case, since different specialists work concurrently on every step of the process. Availability analysts need to work with a "baseline" version of the SE model, i.e., a frozen version, that is not up to date to the latest changes done by the System architect. This de-synchronized work is required because analysis is time consuming, and the System architecture may evolve in the meantime.

At the end of each exchange cycle between the MBSE and MBSA teams, the consistency issues need to be tackled, for instance, performing version merging to re-synchronise availability analysis and MBSE. As a consequence, integrating MBSE and MBSA models into one model is not as efficient as expected, consistency-wise. Moreover, industrial tools able to achieve both objectives are currently not available. We thus prefer to consider two different models for MBSE and MBSA models and make explicit dependency relations between both models. As MBO models will gather data from both MBSE and MBSA models, we plan to rely on these explicit dependency relations in order to build the models.

4.2 The MBO model

Since MBSA requires the inclusion of information related to system failures, components faults and their propagation, the MBSA models are, unavoidably, manually produced (partially at least). On the contrary, the MBO model, as illustrated in figure 4, intends to gather information both from functional (MBSE models) and dysfunctional (MBSA models) in order to present to the operator data in a way that enables managing the strict timing constraints imposed by the space context. We therefore suggest generating the MBO model from both MBSE and MBSA models, and eventual generation configuration data if human expertise is needed in order to select the most appropriate data.

At the same time, as illustrated in figure 4, the MBO model will contain additional information, that are not available neither from the MBSE nor the MBSA generated models, i.e. the "operational knowledge". The goal is to integrate data from previous experience (faults occurred in the past, their identified source fault, their consequence in the system and their resolution), as well as the operators' expertise acquired through long experience in performing operational diagnosis activities, which only exists so far only in the form of human expertise, and not in the form of a model.

At the moment, verbalising the operators' and experts' diagnosis experience is studied only through

[3] www.nomagic.com/products/cameo-systems-modeler

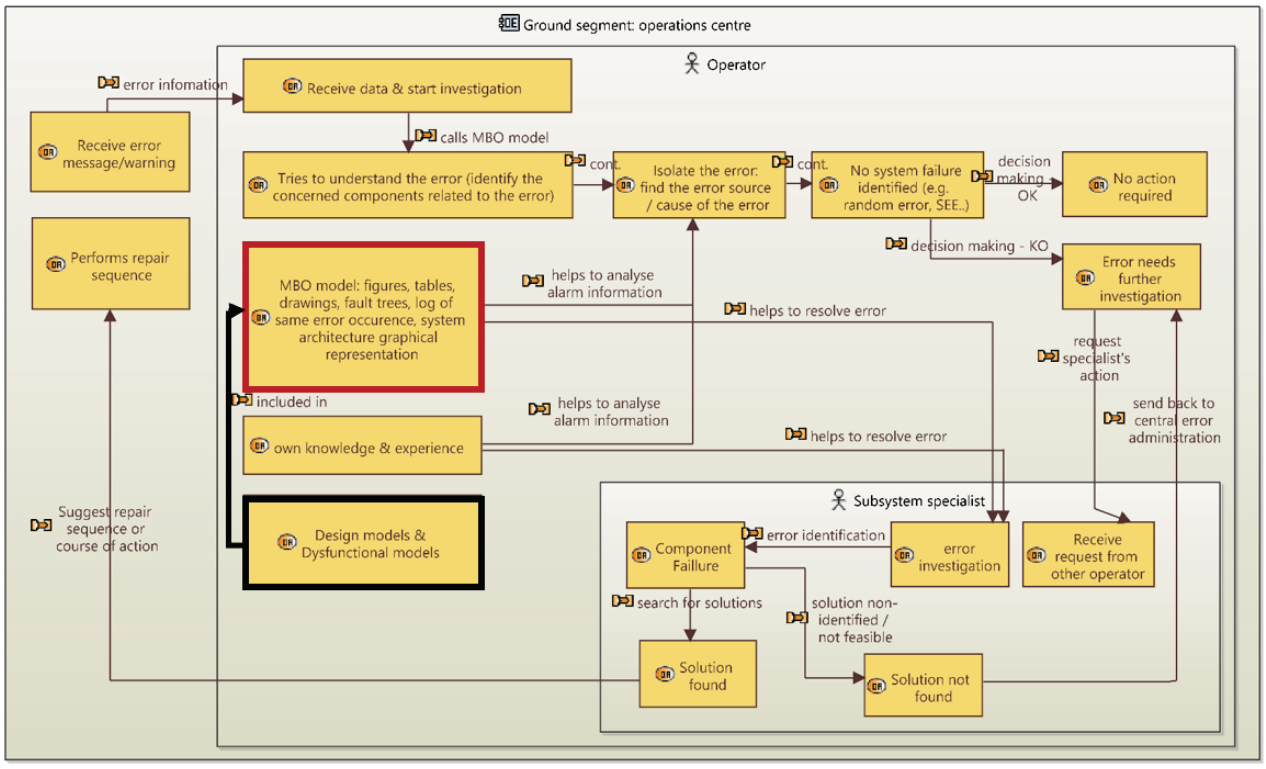


Figure 4 – Including the MBO model in the operational diagnosis procedure.

experimental projects and in low maturity levels. We firmly believe that our proposal will bring a significant improvement in the operational diagnosis community. The elements presented in this paper are the results of an early coarse domain analysis of the space system operation activities. This work is currently being refined and extended to strengthen these results.

In our context and considering our goal, model-based diagnosis techniques will let us specify a way to enrich the MBO (diagnosis) model used in current practice in order to account for more information from the MBSA model. In return, given a precise definition of a MBO model, a range of techniques, based on constraint satisfaction and model-checking, can be used to ensure that different faults produce different symptoms in the MBO model. The precise nature of the algorithms to use depend on the content of the MBO model, and on the reasoning applied to transform observations (symptoms) into explanations (diagnoses).

4.3 Diagnosis approach

Each system component diagnosis can be performed with a technique appropriate to its physical nature (e.g. differential equations for AOCS, linear regression for power supply), to generate *health indicators* such as alarms and other signals. In contrast, the operator receives these health indicators and reasons at the global system level, where the techniques most appropriate are those that integrate well with MBSE and MBSA models.

Symbolic Artificial Intelligence approaches (in opposition to Machine Learning approaches), and in particular consistency-based diagnosis is particularly suitable for integrating knowledge from different sources, and can also be implemented over computation tools such as constraint solvers and SAT solvers.

Let us illustrate our approach with an application example. Suppose an alarm is triggered by the ground segment because some sensor data failed a quality test (e.g. blurry or under-exposed pictures, etc.), and the failure (bad picture quality) is confirmed by the operator. Consistency-based diagnosis can let us immediately rule out many components in the explanation of this alarm. Moreover, consistency-based reasoning lets us confront the initial symptoms and diagnosis test results with models of nominal and abnormal behaviour in order to detect, isolate, identify the fault, to assess that a new type of fault occurred, or to suggest that some parts of the models are wrong or outdated.

MBSE and MBSA models often account for the order of events under the form of state machines. Diagnosis also exists for discrete-event models [Zaytoon, 2013], as well as state estimation [Pralet, 2016]. Data-based (i.e. Machine Learning) approaches have been widely

applied for monitoring industrial processes [Qin], and are a natural complement of model-based approaches. Such approaches can be used as a way to generate new symptoms whose consistency with MBSE and MBSA models is used for diagnosis.

The aforementioned MBO model will gather the meaningful data from the separate development models and make explicit the relations and interactions between the various engineering domains involved in the development of the system. These relations can then be used in order to ease the different models' synchronisation as well as the integration of the various diagnosis conducted by the domain experts in a distributed diagnosis approach.

A list of possible explanations for the symptoms can be automatically generated with various techniques, including consistency-based diagnosis, or a data-based module. However, in the end, the final diagnosis is selected and validated by the operator(s).

5 CONCLUSION

In this paper, the authors defend that the use of model-based approaches in the design and dysfunctional analysis phases of a space system development cycle, in combination with the adoption of a MBO model during the operations and maintenance phase, following the satellite's deployment, can improve the current operational diagnosis practices. The goal is to integrate into one single model all the information useful to the operator to perform diagnosis efficiently. We believe that the proposed methodology and tools are particularly appropriate for application in the space systems domain, where MBSE and MBSA models already exist, so it is a good opportunity to use them for diagnosis.

Beyond recognised common interests, such as aligning and breaking silos in a collaborative way of working, the proposal of adopting a model-based approach that relies on a domain analysis of the operation phase within the life-cycle, will allow making the data (and their interconnection) related to the diagnosis and repair design processes, more explicit. In addition, it will also help making the actual processes and associated methodologies explicit, which one can improve by building tools to automate them.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank all individuals, companies and research institutes involved in the S2C project of IRT Saint Exupéry and IRT SystemX and in particular, Airbus Defence and Space for proposing and supporting this research topic. This work is supported by the French Research Agency (ANR).

REFERENCES

Barreyre C., Laurent B., Loubes J.-M., Boussouf L., Cabon B., 2019. Multiple Testing for Outlier Detection in Space Telemetries. *IEEE Transactions on Big Data*, Vol. 6 Iss. 3.

Cloutier, R.J., 2019. *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*. SEBoK Editorial Board, v. 2.1.

Esfahbod, B., 2013. Vee model for systems engineering process. *Wikimedia Commons*.

INCOSE, 2012. Systems Engineering Handbook (SEBoK): *A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, version 3.2.2. San Diego, CA, USA: International Council on Systems Engineering (INCOSE), INCOSE-TP-2003-002-03.2.2.

INCOSE SE Vision 2020. *INCOSE Technical proceedings*. INCOSE-TP-2004-004-02.

Kleer J., Kurien, J., 2003. Fundamentals of model-based diagnosis. *IFAC Proceedings Volumes*, 36.

Machin M., Saez E., Virelizier P., De Bossoreille, X., 2019. Modeling Functional Allocation in AltaRica to Support MBSE/MBSA Consistency. *Model-Based Safety and Assessment*, 3–17.

Pralet, C., Pucel, X., and Roussel, S., 2016. Diagnosis of intermittent faults with conditional preferences. *Proceedings of the 27th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX'16)*.

Qin, S. Joe., Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis, 2012. *Annual reviews in control* 36.2 (2012): 220-234.

Reiter, R., 1987. A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, 32(1):57-95.

Schwabacher, M., and Goebel, K., 2007. A survey of artificial intelligence for prognostics. *AAAI Fall Symposium: Artificial Intelligence for Prognostics*, p. 108-115.

Takashi, I., 2000. *SATELLITE COMMUNICATIONS: System and its Design Technology*. Tokyo: OHMSHA/IOS Press.

Travé-Massuyès, L., Escobet, T., and Olive, X., 2006. Diagnosability Analysis Based on Component-Supported Analytical Redundancy Relations. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 36:1146-1160.

Zaytoon, J., and Lafortune, S., 2013. Overview of fault diagnosis methods for discrete event systems. *Annual Reviews in Control* 37.2: 308-320.

A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR ASSET MANAGEMENT 4.0

M. EL BOUNJIMI, G. ABDUL-NOUR

Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR)
Trois-Rivières, Canada
Mbarek.Elbounjimi @uqtr.ca, Georges.Abdulnour@uqtr.ca

ABSTRACT: Balancing operational performance, risk and asset life cycle costs to improve operational excellence and obtain the best value from physical assets is a challenge for asset-intensive companies. Industry 4.0 technologies offer opportunities for these companies to build a value-driven and smart asset management system. This paper provides a conceptual framework to help asset-intensive companies implement Asset Management 4.0. The main contribution of this paper is providing the fundamentals of Asset Management 4.0 as well as avenues for further research in this area.
KEYWORDS: Asset management, Decision making, Industry 4.0, Conceptual framework

1 INTRODUCTION

With increasing cost pressures, customer and legal requirements, and climate change, asset-intensive companies face return-on-investment and operational performance challenges. Accordingly, they are beginning to adapt the way they manage their assets by moving from traditional maintenance management to managing the whole asset life cycle. Asset management emerges as an interdisciplinary approach to help an organization move from traditional maintenance management to strategic management of physical assets and their contribution to achieving organizational objectives. The PAS 55:2008 standard defines asset management as the "systematic and coordinated activities and practices through which an organization optimally and sustainably manages its assets, and their associated performance, risks and expenditures over their life cycle for the purpose of achieving its organizational strategic plan". A general definition proposed by the ISO 55000 standard states that Asset Management is the "coordinated activity of an organization to realize value from assets".

The ISO standard puts "value" at the core of asset management and highlights the importance of asset management plans in maximizing the value of assets. Such plans provide a framework for optimizing cost, risk and performance across the asset life cycle.

Given the interdisciplinary nature of asset management in business, its success requires the integration of information from different sources as well as coordination between several business functions (maintenance, production, engineering, finance, etc.). Unfortunately, in most companies, asset-related data are fragmented across multiple information systems and departments, which makes it challenging to have visibility and make optimal and informed decisions.

Emerging Industry 4.0 has rapidly changed the business environment. It is understood as the fourth generation of manufacturing enabled by new technologies, such as the Internet of Things (IoT), Cyber-Physical Systems (CPS), Cloud computing and Big Data Analytics. Using asset sensor data, it is possible to perform an accurate life cycle assessment for an asset, as a means of making informed decisions to balance performance, costs, and risks.

So, to develop an integrated and intelligent asset management system, industrial organizations can exploit the potential of Industry 4.0. To do this, they must introduce changes to their information technology infrastructure, as well as their culture and competences.

Recently, there has been a growing interest in research on the application of Industry 4.0 in maintenance management. However, to the best of our knowledge no study has explicitly addressed asset management in the Industry 4.0 context. Therefore, this research aims to fill the gap by developing a conceptual framework for Asset Management 4.0 (AM 4.0).

This paper is organized as follows: the following section presents the research method and the literature review findings. The conceptual framework for AM 4.0 is developed in Section 3. Finally, in Section 4, conclusions with future research avenues are presented.

2 RESEARCH METHODOLOGY

Nowadays, asset management is recognized as a systematic process to get the best value from physical assets (ISO 55001). This process is a result of informed asset management decisions made over the asset's life cycle (El-Akruti et al. 2013; Roda and Macchi, 2016). AM 4.0 emerges as a smart way to manage assets and make informed decisions by taking advantage of Industry 4.0 technologies.

In order to identify the main fundamental elements of the AM 4.0 concept, we ask two questions:

- RQ1: How can the best value be derived from assets?
- RQ2: What are the enablers and capabilities for Asset Management 4.0?

To address these research questions, two literature reviews were conducted:

- Literature review on asset value-driven decision making;
- Literature review on asset management digitalization and Industry 4.0.

The overall review methodology is graphically presented in Figure 1.

AM 4.0 is a new concept; to get the greatest insight we review and classify relevant studies from both scientific literature and professional reports on this concept. The literature sources are investigated in Elsevier's Scopus, Google Scholar and regular search engines, which include books, conference papers, peer-reviewed papers, industrial reports and white papers. The search keywords and the selection criteria specific to each literature review will be presented in the following sections.

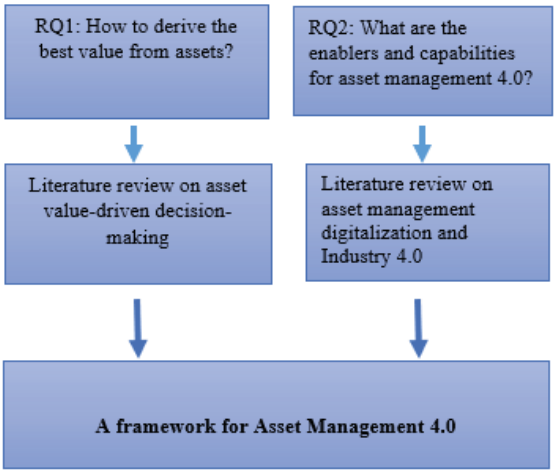


Figure 1 Research methodology

2.1 Literature review on asset value-driven decision making

In this review, the content-analysis based literature review was carried out using Scopus and Google Scholar databases. Keywords for the search include: "value and asset management," "asset management and decision making" and "asset management and value". The selection criterion was content that was focused on best practices and value creation in asset management. Exhibit 1 presents the number of reviewed and selected papers.

Exhibit 1: Literature review 1 papers

Database (Reviewed Papers)	Selected papers
Scopus (10)	4
Google & Google Scholar (15)	7

The main findings of this review are presented as follows:

Value realization

Value is a critical aspect and is considered one of the fundamental pillars of asset management (ISO 55000, 2014; Roda et al., 2016; Márquez et al., 2020). No standard definition of value delivered by assets can be found in the literature.

- In their study, Márquez et al. (2020) concluded that value is very much dependent on the company's purpose, the nature of its assets, its strategic objectives and the expectations of its stakeholders. El-Akruti et al. (2013) add that value is obtained by acquiring assets that allow an organization to fulfil its strategic objectives.
- Value realization involves the vertical alignment of stakeholder expectations and organizational objectives with operational planning and control, as well as the horizontal influences of risk and compliance constraints on planning and decision-making process (GFMAM, 2016; ISO 55002, 2018).
- Asset management is a holistic process; therefore, its focus should be on all assets (portfolio) that an organization uses to fulfil its objectives, rather than on managing assets individually (ISO 55000: 2014; Márquez et al., 2020).
- A value-driven AM system requires considering value as a decision-making criterion at all organizational levels (Roda et al., 2016; ISO-55002, 2018).
- The primary challenge of value realization is to achieve optimal utilization of the assets over their productive life cycle and identify the need and timing for replacement and/or enhancement. Such decisions can considerably affect return on investment (Roda et al., 2016; Márquez et al., 2019).
- To be optimal, AM-related planning decisions need to be based on the Total Cost of Ownership (TCO) and risk (Márquez et al., 2019).

AM key decisions

Asset management decisions are made at all levels of the organization: strategic, tactical, and operational (IIMM, 2006; Sardar, 2006; IAM, 2016):

- Strategic decisions
  - Asset management strategy
  - Asset acquisition/creation/renewal/retirement
  - Asset and business strategic alignment
  - Capital investment decisions
- Tactical decisions
  - Asset design and layout
  - Life Cycle Value Realisation
  - Operations and maintenance decisions
  - Asset life cycle risk identification
  - Asset reliability engineering
  - Resourcing strategy
  - Shutdowns and outage strategy
  - Asset functional flow assessment
- Operational decisions
  - Asset condition assessment

- Prognostics and diagnostics
- Maintenance execution and management
- Asset operation and usage reporting

2.2 Literature review on asset management digitalization and Industry 4.0

In this review, the content-analysis based literature review was carried out using Scopus and Google Scholar databases. Keywords for the search were determined and include: "digital asset management," "asset management and Industry 4.0" and "asset management and digitalization". The selection criterion was content that was focused on the digitalization of asset management. Exhibit 2 presents the number of reviewed and selected papers.

Exhibit 2: Literature review 2 papers

Database (Reviewed Papers)	Selected papers
Scopus (10)	2
Google & Google Scholar (17)	6

The main findings of this review are as follows:

- Industry 4.0 enables organizations to build an integrated and smart ecosystem that digitizes and integrates processes vertically across the entire organization, from product development and purchasing through manufacturing, distribution and service

.

AM and Industry 4.0

- The core principles of AM are (Roda and Macchi, 2018): life cycle, system, risk and asset information.
- The key Industry 4.0 principles are (Akdil et al., 2018): integration of business processes, interoperability, agility, virtualization, decentralization, real-time visibility, service orientation and modularity.
- Industry 4.0 includes a panoply of technologies (Akdil et al., 2018): big data, artificial intelligence, cloud computing, Internet of Things, cyber-physical systems, cybersecurity, autonomous robots/machines, inter-machine communication (machine-to-machine, M2M), simulation systems and augmented reality.
- Digitalization of predictive maintenance in an asset-intensive business will require new skills and a different way of thinking (Haarman et al., 2017).

AM information requirements

- The minimum asset management information requirements at the strategic level (IIMM, 2006; IAM, 2016) are:
  - predicting the future capital investments required to minimize failures by determining replacement costs;
  - assessing the financial viability of the organization to meet costs through estimated revenue;
  - predicting capital investments required to prevent asset failure; predicting the decay, model of failure or reduction in the level of service of assets or their components, and the necessary rehabilitation/replacement programs to maintain an acceptable level of service;
  - assessing the organization's ability to meet costs (renewal, operations, and maintenance) through predicted revenue;
  - modelling what-if scenarios such as technology change/obsolescence, changing failure rates and the risks they pose to the organization, and alterations to renewal programs and likely effect on service,
  - altering maintenance programs and the likely effect on renewal costs; and
  - assessing the impacts of environmental/competitive changes.

- The minimum requirements from information systems at the operational and planning/management levels are (IIMM, 2006; IAM, 2016):
  - knowing which assets the organization is responsible for and where they are;
  - knowing the condition of the assets;
  - establishing maintenance, operational and renewal regimes suitable to the assets and the level of service required of them by present and future customers;
  - reviewing maintenance practices;
  - implementing job/resources management;
  - improving risk management techniques;
  - identifying the true cost of operations and maintenance; and
  - optimizing operational procedures (IIMM 2006).

- Smart asset management combines the fields of asset management, technology management, and organizational decision making (Nel & Jooste et al., 2016).

AM 4.0 concept and dimensions

- Capgemini (2017) proposes a maturity model for Asset Performance Management (APM). The model includes seven dimensions: 1) Asset Information Management 2) Process Management 3) Reliability and Performance 4) Governance and Standards 5) People and Culture Management and 7) Tools and Technologies.
- Haarman et al. (2017) present an approach for implementing predictive maintenance 4.0, including four dimensions to assess maturity: content (data required); performance measurement; IT infrastructure; and organizational structure, skills, capabilities, incentives, etc.

- Strategic planning of AM defines the design of AM processes and the choice of their enabling technology and aligns the operational and strategic levels (Haider, 2013);

- The performance measurement of asset management systems remains less understood in both industrial practice and academic research (Attwater et al., 2014);
- The main AM enabling technologies are (Koronios et al., 2005; Sardar, 2006; Haider, 2013; Haarman, 2017; Capgemini, 2017; Márquez et al., 2019; Edwards, 2019):

• ERP-Enterprise Resource Planning
• AIP-Asset Investment Planning
• DT-Digital Twin
• ML-Machine Learning
• BDA-Big Data Analytics
• APM-Asset Performance Management
• EAM/CMMS- Enterprise Asset Management
• CPS-Cyber Physical System
• IoT-Internet of Things
• GIS- Geographic Information System
• SCADA- Supervisory Control and Data Acquisition
• Sensors

Asset performance management (APM) is currently the technology most desired by asset-intensive companies (ABB, 2016). This technology suite encompasses the capabilities of data capture, integration, visualization and analytics tied together for the explicit purpose of improving the reliability and availability of physical assets. APM includes the concepts of asset condition monitoring (CM) and reliability-centered maintenance (RCM).
IT-OT integration in the organization is not just about integrating technologies and systems, it is also about integrating different departments (finance, maintenance, engineering, production, etc.) and people to build stronger asset management efforts (ABB, 2016).
Edwards (2019) presents a framework for realizing the value of Building Information Modelling (BIM).
None of the articles found provided a conceptual framework for asset management 4.0. Exhibit 3 presents the main articles found.

Exhibit 3: The main Asset Management 4.0-related articles

Article	Title	Main finding
Nel & Jooste al. (2016)	A technologically-driven asset management approach to managing physical assets-a literature review and research agenda for smart asset management	Smart asset management is still a new concept; further exploration is required.
Capgemini (2017)	Asset Performance Management Maturity Model	Asset performance maturity model
Khuntia et al. (2017)	Smart Asset Management for Electric Utilities: Big Data and Future	Exploring the future challenges in smart asset management in terms of big data and new technologies.
Edwards (2019)	Digital Asset Management	A framework for realizing the value of BIM

3 A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR ASSET MANAGEMENT 4.0

The concept of asset management 4.0 is explicitly addressed for the first time in this article. Based on the results of this research, we can define Asset Management 4.0 as: "integrated and smart value-driven asset management".
We have identified five dimensions to develop the Asset Management 4.0 framework: *Integrated planning, Value-driven decision making, Enablers & capabilities, Asset information management and Performance measurement & improvement*. Figure 2 graphically illustrates the conceptual framework and the relationships between the five dimensions.

Integrated planning
The classic planning approach is functionally controlled and linear. From production to maintenance to finance, each unit creates internal plans. In addition, sometimes different systems and data sources are even used to create them. In contrast to classic planning, integrated planning provides a cross-functional process. The results are optimal planning and higher coordination within the company. Furthermore, effective AM strategic planning can improve financial performance. According to reliabilityweb, an effective strategic plan typically results in a 20%–50% reduction in maintenance costs accompanied by a 15%–20% increase in real capacity, with no capital investment in production equipment.

Value-driven decision making
Value-driven asset management decision making is about how to ensure the highest level of value creation from the asset portfolio. Value realization takes place over the entire life cycle of each critical asset, and value is optimized through the coherent management of costs, risks and performance.
Effective decision making requires an integrated process in order to ensure consistent and coordinated decision making across organizational levels that aligns with business objectives.

Enablers & capabilities
The main enabling technologies and capabilities of Asset Management 4.0 are:
Information Technologies
- ERP-Enterprise Resource Planning
- AIP-Asset Investment Planning
- BI-Business intelligence
- DT-Digital Twin
- ML-Machine Learning
- BDA-Big Data Analytics
- APM-Asset Performance Management
- EAM/CMMS- Enterprise Asset Management
- MES-Manufacturing execution system

Operational Technologies
- CPS-Cyber Physical System

- IoT-Internet of Things
- Drone
- GIS- Geographic Information System
- SCADA- Supervisory Control And Data Acquisition
- Sensors

Competences

Digital transformation of asset management systems will have a profound effect not only on information infrastructure, but also on the organizational structure. To be successful, new skills and competencies in IT, data science and artificial intelligence as well as culture change are required. It is evident that effective leadership and top-level support is essential to deal with different decision-making challenges.

Another important capability is integration and coordination between departments and asset management information systems.

Asset information management

Asset information management should include an information strategy as well as standards for collecting, storing and processing data and information. It seeks to enhance coordination and transparency of asset management processes through a bottom-up approach. At the operational and tactical levels, information systems are required to provide necessary support for planning and execution of core asset life cycle processes.

Performance measurement & improvement

Continuous improvement of asset management systems requires a good performance measurement system that allows asset-intensive organizations to understand asset performance as well as the performance of AM processes. The improvement of AM systems is a critical element that must be seriously considered to ensure long-term performance by setting up key indicators (KPI) for operational and organizational performance. Continuous improvement of operations and maintenance (O&M) activities is a key component of the AM process, as O&M practices can significantly impact asset life cycle costs, risk management and service delivery performance.

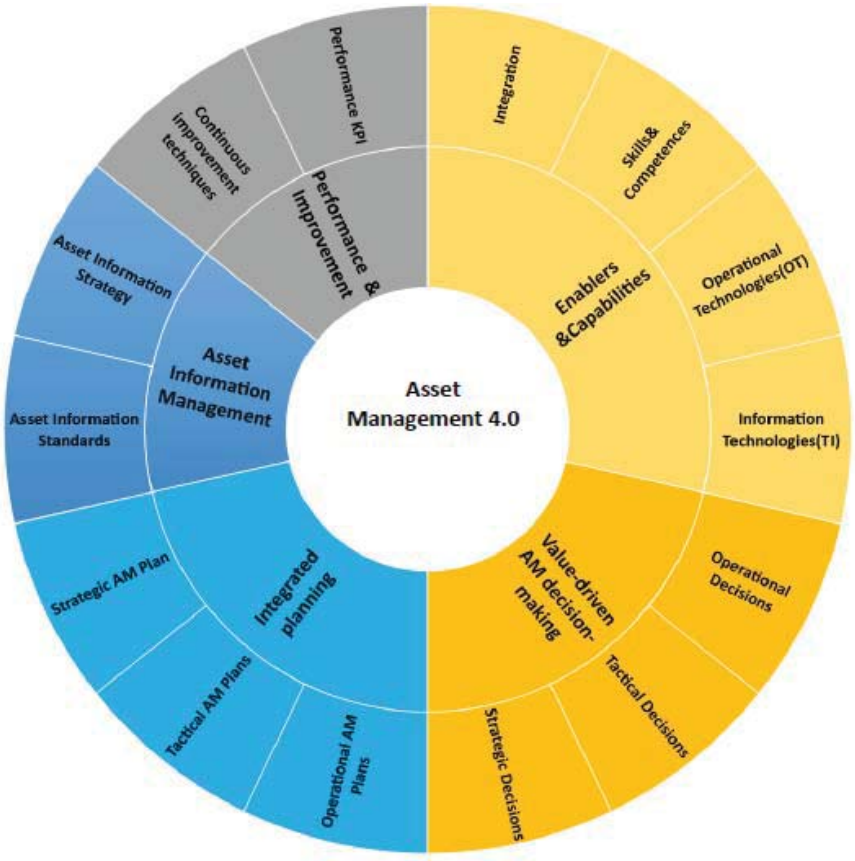


Figure 2 Conceptual framework for Asset Management 4.0

4 CONCLUSION

Industry 4.0 provides asset-intensive organizations with unprecedented opportunities for managing asset costs, risks and performance in a value-realization context.

This article proposes a novel conceptual Asset Management 4.0 framework to fill the gaps identified in the literature. The proposed framework is a conceptual model aimed at conceptualizing Asset Management 4.0 through five key dimensions (constructs).

The framework provides a complete view of all dimensions that must be taken into consideration to build a successful ecosystem. The logic of relationships between the constructs is clear and justified. The framework is a good starting point for the development of research in the field of Asset Management 4.0.

It should be noted that there is a scarcity of studies on Asset Management 4.0, especially real case studies to drive this research. So, empirical research and real application are needed to validate this framework. In addition, we present some research perspectives:

- What are the barriers in terms of capabilities and skills to implementing AM 4.0?
- How can coordination between departments influence AM 4.0 success?
- What are the barriers in terms of integration and interoperability of AM 4.0 technologies/systems?
- How does the strategic vision and leadership influence AM 4.0 implementation?
- What are the most impactful technologies in AM 4.0?
- What are the information infrastructure requirements for AM 4.0?

REFERENCES

ABB(2016). Bridging IT and OT for the connected asset lifecycle management era.

Akdil, K. Y., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). Maturity and readiness model for industry 4.0 strategy. In Industry 4.0: Managing the digital transformation (pp. 61-94) Springer.

Attwater, A., Wang, J. Q., Parlikad, A., & Russell, P. (2014). Measuring the performance of asset management systems.

BSI PAS 55:2008. British Standards Institution's Publicly Available Specification.2008

Capgemini (2017). Asset Performance Management Maturity Model. Strategic Roadmap to Digital Manufacturing.

Edwards, R. (2019). Digital Asset Management. In Asset Management: Adding value to asset dependent businesses (pp. 183-194). ICE Publishing.

El-Akruti, K., Dwight, R., & Zhang, T. (2013). The strategic role of engineering asset management. International Journal of Production Economics, 146(1), 227–23.

GFMAM, (2016).Global Forum on Maintenance and Asset Management. The value of Asset Management to an organisation, First Edition.

Haider, A. (2013). Information Systems for Asset Management–Implementation, Issues and Value Profile. In Information Systems for Engineering and Infrastructure Asset Management (pp. 53-98). Gabler Verlag, Wiesbaden.

PAS55:2008-1:2008. British Standards Institute. Specification for the optimized management of physical assets, 2008.

Roda, I., & Macchi, M. (2016). Studying the funding principles for integrating Asset Management in Operations: an empirical research in production companies. In 3rd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology AMEST 2016 (pp. 1-6). Elsevier BV.

Márquez, A. C., Macchi, M., and Parlikad A. K. 2019. Value Based and Intelligent Asset Management. Seville, Spain. DOI= https://doi.org/10.1007/978-3-030-20704-5.

Haarman M, Mulders M and Vassiliadis C (2017) Predictive Maintenance 4.0: Predict the Unpredictable. PwC, Amsterdam, the Netherlands.

IAM(2016). Institute of Asset Management. Asset Management Maturity Scale and Guidance.

ISO 55000:2014, Asset management - Overview, principles and terminology.

ISO 55001:2014, Asset management - Management systems – Requirements.

ISO 55002:2014, Asset management - Management systems – Guidelines for the application of ISO 55001.

Khuntia, S.; Rueda, J.L.; Meijden, M.A. Smart Asset Management for Electric Utilities: Big Data and Future. 12th World Congress on Engineering Asset Management, (2017).

Koronios, A., Lin, S., & Gao, J. (2005). A data quality model for asset management in engineering organisations. In ICIQ.

Nel, C. B. H., & Jooste, J. L. (2016). A technologically-driven asset management approach to managing physical assets-a literature review and research agenda for smart asset management. South African Journal of Industrial Engineering, 27(4), 50-65.

Roda, I., & Macchi, M. (2018). A framework to embed asset management in production companies. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 232(4), 368–378.

Relaibility web(2020). Strategic planning for asset management -an overview

Sardar, G., Ramachandran, N., & Gopinath, R. (2006). Challenges in achieving optimal asset performance based on total cost of ownership. In Engineering Asset Management (pp. 54-63). Springer, London.

SAP(2019). Intelligent Asset Management – Powering the digital Transformation of Asset Management https://www.orianda.com/fileadmin/pdf/ebooks/SAP_Intelligent_Asset_Management_-_White_Paper.pdf

SIMULATION D'UNE CHAÎNE DE VALEUR CIRCULAIRE DANS LE BALAYAGE DE RUE PRINTANIER : ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

FLORENCE BLOUIN, JEAN-FRANÇOIS AUDY ET AMINA LAMGHARI

Université du Québec à Trois-Rivières – Canada
florence.blouin@uqtr.ca, jean-francois.audy@uqtr.ca, amina.lamghari@uqtr.ca

RÉSUMÉ : *Chaque hiver dans les pays nordiques, des abrasifs sont achetés et épandus par les administrations publiques sur le réseau routier. Lors du balayage de rue printanier, une portion de ces abrasifs est collectée puis généralement enfouie. Afin de contrer les effets négatifs environnementaux et monétaires de l'enfouissement, la faisabilité technique d'un conditionnement des abrasifs récupérés pour un réemploi lors des saisons hivernales subséquentes est démontrée. Néanmoins, aucune étude n'a évalué les bénéfices potentiels d'une transition de l'actuel scénario de chaîne linéaire vers une chaîne circulaire. Cet article propose un modèle de simulation des opérations reliées au balayage de rue printanier permettant de vérifier la faisabilité économique de cette alternative. Les deux scénarios de chaîne étudiés sont comparés selon divers indicateurs de performance pour un cas d'étude au Québec. Les résultats préliminaires indiquent que l'intégration de l'économie circulaire dans cette filière permettrait de réaliser jusqu'à 84% d'économies potentielles par rapport à l'approche linéaire actuelle.*

MOTS-CLÉS : *simulation des systèmes, économie circulaire, chaînes logistiques, valorisation des matières résiduelles, gestion des opérations.*

1 INTRODUCTION

Chaque année en viabilité hivernale dans les pays nordiques, des abrasifs de source minérale (sable, gravier et pierres concassées) sont achetés et épandus par les administrations publiques. La viabilité hivernale désigne l'ensemble des opérations d'entretien du réseau routier pour assurer de bonnes conditions de circulation. Au printemps, une portion des abrasifs épandus est collectée lors des opérations de balayage de rue printanier. Sujette à une stricte réglementation environnementale, cette matière résiduelle récupérée est essentiellement enfouie. Afin de contrer les effets négatifs environnementaux et monétaires de l'enfouissement, une majeure partie des matières récupérées pourraient être réemployées créant de cette manière une chaîne de valeur circulaire. Toutefois, l'intégration de l'économie circulaire dans cette filière requiert une étude approfondie de la chaîne de valeur actuelle (linéaire) et envisageable (circulaire) afin de valider la faisabilité économique de cette solution ainsi que ses bénéfices potentiels.

Cet article a pour objectif de proposer un modèle de simulation permettant de comparer le scénario linéaire actuel à une chaîne de valeur circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. La simulation Monte-Carlo a été utilisée pour représenter le scénario linéaire alors que la simulation à évènements discrets a été utilisée pour le scénario circulaire. À terme, cette étude permettra de vérifier la faisabilité économique de l'intégration de l'économie circulaire dans cette filière tout en mesurant les bénéfices monétaires et environnementaux qu'engendrerait sa mise en œuvre. Par conséquent, un cas d'étude a été sélectionné pour fins de démonstration théorique du modèle de simulation tout en permettant l'analyse des deux scénarios possibles en fonction notamment des coûts et des flux de matières. Les chaînes de valeur linéaire et circulaire sont donc simulées afin d'en étudier le coût total. Ce dernier implique les coûts associés aux diverses opérations (balayage, transport, triage et fabrication, les coûts d'achat d'abrasifs vierges et les coûts d'enfouissement. Le modèle permet également de faire le suivi des flux de matières tout au long de la chaîne concernée. Sont aussi simulés, notamment, la quantité annuelle d'abrasifs épandus, la portion de matières collectées étant revalorisable, la quantité d'abrasifs usagés fabriqués et la quantité de matières acheminées à l'enfouissement. Il convient toutefois de noter que cette étude et ses résultats sont préliminaires.

Le reste de l'article est organisé comme suit : à la suite d'une recension des écrits non exhaustive à la section 2, les sections 3 et 4 décrivent le cas d'étude et le modèle de simulation, respectivement. Les principaux résultats de la simulation sont présentés et discutés dans la section 5. Enfin, la section 6 donne quelques conclusions et perspectives de travaux futurs.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les impacts environnementaux négatifs de l'économie linéaire (extraire, consommer, fabriquer et jeter), prédominante dans le système économique actuel, ne sont plus à démontrer. La littérature fait également état de l'incidence du modèle linéaire sur la rareté croissante des ressources naturelles (Sørensen, 2017). L'économie circulaire représente une solution viable et durable permettant de faire face à ces enjeux contemporains (Sariatli, 2017). Ainsi,

selon Werning et Spinler (2020), son intégration permet de diminuer les déchets et, par conséquent, mener à une situation souhaitable à la fois pour les entreprises, l'économie et l'environnement. En effet, la création d'un cycle de production en boucle fermée pour réutiliser certaines ressources permet d'augmenter leur utilisation et leur disponibilité tout en amenant la redéfinition des rôles des parties prenantes (Sariatli, 2017). De plus, le passage de l'économie linéaire à l'économie circulaire renforce la compétitivité mondiale et crée de nouveaux emplois (Nestorovic et Radicevic, 2019), répondant ainsi à d'autres objectifs du développement durable. Ce concept en pleine émergence, considéré comme un nouveau paradigme économique selon Korhonen et al. (2018), implique donc nécessairement une gestion des flux de matières, une amélioration du service et un modèle économique accessible (Nestorovic et Radicevic, 2019).

Toutefois, bien que les avantages environnementaux de l'économie circulaire soient évidents, son implantation dans une organisation peut s'avérer plus difficile du point de vue économique (Genovese et al., 2017). Davantage de travaux de recherche apparaissent pourtant nécessaires afin de garantir que les impacts environnementaux associés à sa mise en œuvre contribuent à la durabilité (Korhonen et al, 2018). Évidemment, des bénéfices doivent être engendrés lors du passage de l'économie linéaire à l'économie circulaire et c'est pourquoi une quantification et un contrôle sont primordiaux (Esbensen et Velis, 2016). Urbinati et al. (2017) évoquent d'ailleurs que lors de ce changement, il est primordial de considérer la proposition de valeur aux clients, les interactions avec les parties prenantes et la réorganisation des activités internes de l'organisation. Plusieurs travaux dans la littérature suggèrent ainsi d'adopter une approche systémique et d'évaluer les bénéfices de la mise en œuvre de l'économie circulaire à l'échelle de la chaîne de valeur, soit en tenant compte des différents coûts d'activités, des options de revalorisation, des réglementations concernant les matières résiduelles, du taux de récupération, de l'utilisation des ressources vierges et du bilan carbone (Fulconis et Philipp, 2016 ; Cong et al., 2017 ; Genovese et al., 2017 ; Winans et al., 2017). Néanmoins, ce type d'études est rarement réalisé selon un constat de la revue de la littérature récente de Merli et al. (2018). Cet article vise donc à combler ce vide dans la littérature en s'intéressant particulièrement au domaine du balayage de rue printanier dans les pays nordiques.

De nombreux articles font état de l'utilisation d'un modèle de simulation dans le cadre de l'implantation d'une économie circulaire. C'est le cas de Fiona et al. (2019) qui ont réalisé une simulation pour décrire le processus de prise de décision dans un procédé de reconditionnement. On retrouve aussi des auteurs tels que Franco (2019) qui ont simulé puis analysé les effets de la combinaison de plusieurs stratégies de conception de produits et de modèles commerciaux pour une chaîne de valeur circulaire. Dans leur article, Yazan et Fraccascia (2020) soutiennent que le concept de symbiose industrielle, c'est-à-dire que les déchets d'une entreprise sont utilisés comme intrants pour d'autres, est l'élément de succès pour la mise en œuvre de l'économie circulaire. Toutefois, puisque ces déchets ne peuvent être produits selon la demande, une simulation doit être effectuée pour quantifier ces derniers et définir la manière dont les entreprises partageront les avantages économiques (Tsiliyannis, 2019). Par ailleurs, Michael et al. (2017) ont développé un modèle de simulation pour mesurer les impacts économiques et environnementaux de différentes stratégies (réutilisation, reconditionnement ou recyclage) d'intégration de l'économie circulaire afin d'identifier la plus appropriée selon le contexte. Considérant les bénéfices connus du passage d'un modèle linéaire à circulaire, Hunumante et al. (2019) ont pour leur part suggéré la réalisation d'une évaluation des effets systémiques de l'économie circulaire à l'échelle mondiale dans un modèle prenant en compte des facteurs humains, écologiques et industriels. Pour ce qui est des applications dans des domaines particuliers, Nevrlý et al. (2021) ont proposé une solution pour une municipalité à l'attribution des points de collecte des déchets par le biais d'une étude de simulation optimisant différents paramètres tels que la distance, le nombre d'emplacements, le temps de service et le coût total. Xu et al. (2018) ont quant à eux réalisé une simulation de l'économie circulaire sur l'utilisation du fumier d'élevage dans une société de production d'électricité au biogaz en analysant les coûts et les avantages environnementaux. De plus, Ye et al. (2020) ont simulé une technologie de centrale électrique au charbon associée à une incinération des déchets permettant la conservation des combustibles fossiles et l'élimination des déchets afin de la comparer à un système au charbon conventionnel. Weber et al. (2020) se sont penchés sur le gaspillage alimentaire associé à la patate douce en proposant une solution de revalorisation rentable en éthanol et en boissons distillées engendrant une réduction des émissions de gaz à effet de serre. La simulation a également été utilisée par Lieder et al. (2017) afin d'analyser l'acceptation du marché dans un contexte d'économie circulaire. Enfin, certains auteurs ont démontré les avantages de l'industrie 4.0 dans le processus d'approvisionnement d'une économie circulaire notamment par la simulation d'un modèle de logistique inverse (Bag et al., 2020 ; Dev et al., 2020).

Concernant spécifiquement la recension des écrits sur la filière étudiée dans cet article, Donovan (2005), Pulley et Baird (2010) et Mokwa et Foster (2013) ont réalisé des travaux sur le réemploi des balayures de rues comme abrasif en viabilité hivernale alors que Mokhbi et al. (2017) ont considéré une valorisation comme substitut à des matières premières dans les enrobés en infrastructure routière. Les études susmentionnées ont abordé et validé la faisabilité technique de la réutilisation des matières collectées lors du balayage de rue printanier. Ainsi, au meilleur de la connaissance des auteurs, il s'agit donc des premiers travaux sur l'implantation de l'économie circulaire dans ce domaine, et ce, par le biais d'une étude de simulation. Aucune étude sur la faisabilité économique de cette solution n'a d'ailleurs été effectuée jusqu'à présent.

L'article contribue ainsi à la recherche en ce sens en comparaison aux travaux précédemment réalisés.

3 ÉTUDE DE CAS

Les données qui servent d'intrants au modèle de simulation présenté dans cet article ont été collectées par le biais d'une situation réelle impliquant une entreprise de balayage de rue printanier au Québec, Canada. Des partenaires du milieu pratique ont également été mis à contribution incluant des villes, le gouvernement provincial et différents chercheurs. Le modèle de simulation conçu a été démontré théoriquement avec un seul cas d'étude, soit à l'aide de données associées à des balayures de rue collectées sur les autoroutes uniquement. Deux scénarios ont été implémentés dans le modèle.

Le scénario de référence représente le scénario actuel, soit la chaîne de valeur linéaire (voir Figure 1 – haut). Ce modèle débute avec l'achat à l'externe d'abrasifs vierges qui sont ensuite utilisés en viabilité hivernale. Au printemps, le balayage mécanique est effectué, suivi du transport des balayures collectées aux sites d'enfouissement ciblés. De ce fait, une partie des abrasifs épandus est enfouie alors qu'une autre n'est tout simplement pas récupérée.

Le scénario simulé, quant à lui, représente la situation alternative possible, soit la chaîne de valeur circulaire (voir Figure 1 – bas). Ce scénario débute également avec l'achat à l'externe d'abrasifs vierges qui sont épandus en hiver. Comme dans le modèle linéaire, une partie des abrasifs épandus n'est pas récupérée, et une partie est collectée par balayage mécanique au printemps. Toutefois, plutôt que d'enfouir directement les balayures collectées, elles sont acheminées à un centre de triage où elles sont divisées en deux catégories. La première représente une portion de balayures qui servira d'intrants à la fabrication d'abrasifs usagés, qui une fois combinés selon une recette définie à des abrasifs vierges, pourront être réemployés en viabilité hivernale. L'autre partie des balayures triées n'étant pas admissible à la revalorisation selon les normes en vigueur sera néanmoins acheminée au lieu d'enfouissement technique.

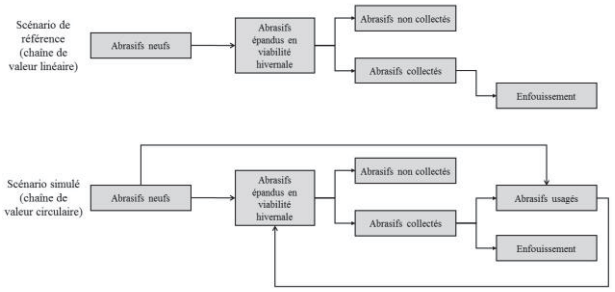


Figure 1 : Scénario linéaire (haut) et scénario circulaire (bas) de chaîne de valeur dans le domaine du balayage de rue printanier

4 MODÈLE DE SIMULATION

Un modèle de simulation est proposé permettant de vérifier la faisabilité économique de la transition de l'économie linéaire à circulaire.

4.1 Collectes de données

Le modèle de simulation, représentant à la fois la chaîne de valeur linéaire et circulaire, requiert diverses données en entrée concernant notamment les coûts et les flux de matières. La quantité annuelle de matières épandues et la quantité annuelle de matières collectées diffèrent d'une année à l'autre et sont donc considérées stochastiques (incertaines). Les données historiques indiquent que ces quantités suivent une loi uniforme. Les paramètres de ces lois ont été estimés en utilisant le logiciel *EasyFit*. Puisque l'horizon considéré dans cette étude est court, soit deux ans, le coût d'achat des abrasifs vierges, le tarif d'enfouissement des balayures ainsi que les coûts d'opération unitaires incluant ceux de balayage, de transport, de triage et de fabrication sont considérés déterministes et fixes. Ces paramètres ont été obtenus par le biais des différents partenaires du milieu pratique. Également, la recette pour la fabrication des abrasifs usagés ainsi que les distances parcourues lors des transports ont été indiquées approximativement en fonction de renseignements reçus des partenaires.

Spécifiquement pour le scénario de l'économie circulaire, les proportions résultantes du processus de triage des matières selon les deux débouchés possibles (réemploi ou enfouissement) doivent être connues. Ces valeurs ont été fournies dans le cadre d'autres travaux par des partenaires en s'assurant également que les balayures étaient conformes aux normes en vigueur pour la revalorisation.

4.2 Conception du modèle

Le modèle de la chaîne de valeur linéaire constitue un problème statique, puisqu'il n'y a aucun lien entre les années en ce qui a trait aux flux de matières et aux coûts. La simulation Monte-Carlo a donc été employée pour ce scénario. Quant au modèle de la chaîne de valeur circulaire, le problème est dynamique, car la quantité d'abrasifs usagés fabriquée à une année donnée va approvisionner ce qui sera épandu lors de l'année suivante. Par conséquent, dans cette situation, la simulation à évènements discrets a été utilisée. Le logiciel exploité pour la conception du modèle est *SIMIO*. Le modèle de simulation a été effectué sur une période de deux ans afin de démontrer l'effet en boucle des flux de matières engendré par l'intégration de l'économie circulaire.

La simulation se limite aux opérations associées aux chaînes de valeur linéaire et circulaire présentées à la Figure 1. Les éléments du système pris en compte dans le modèle sont l'ensemble des coûts de la chaîne concernée, soit les coûts associés aux diverses opérations (balayage, transport, triage et fabrication), les coûts d'achats

d'abrasifs vierges et les coûts d'enfouissement. Le suivi des flux de matières tout au long de la chaîne est aussi considéré dans le modèle. Ainsi, à partir de la quantité annuelle d'abrasifs épandus, la portion de matières collectées, la quantité étant revalorisable, la quantité d'abrasifs neufs supplémentaires achetés pour la fabrication d'abrasifs usagés, le total d'abrasifs usagés fabriqués et la quantité de matières acheminées à l'enfouissement ont été simulés à l'aide du modèle.

Certaines hypothèses ont été émises, notamment en ce qui a trait aux coûts. La majorité des coûts a été estimée, mais les estimations utilisées demeurent représentatives de la réalité.

4.3 Méthode d'analyse des scénarios

La comparaison entre le scénario de référence (chaîne de valeur linéaire) et le scénario à simuler (chaîne de valeur circulaire) sera effectuée en termes de deux indicateurs de performance. Le premier indicateur représente les coûts de la chaîne concernée. Ces derniers incluent les coûts d'achat de matières vierges, les coûts associés à l'enfouissement, ainsi que les coûts des opérations, soit ceux reliés au balayage, au transport, au triage et à la fabrication de matières. Le deuxième indicateur est associé aux divers flux de matières, soit le nombre de tonnes d'abrasifs total épandus, le nombre de tonnes d'abrasifs neufs épandus, le nombre de tonnes d'abrasifs usagés épandus, le nombre de tonnes d'abrasifs collectés, le nombre de tonnes d'abrasifs enfouis, le nombre de tonnes d'abrasifs revalorisés, le nombre de tonnes d'abrasifs achetés pour la fabrication d'abrasifs usagés et le nombre de tonnes d'abrasifs usagés fabriqués.

4.4 Vérification et validation du modèle

Le modèle de simulation a été vérifié en l'exécutant à plusieurs reprises afin de s'assurer qu'il fonctionne comme désiré. En ce qui concerne la validation du modèle, à partir de la demande en abrasifs annuelle générée par la distribution de probabilités lors de la simulation, les autres valeurs attendues des indicateurs de performance ont été calculées manuellement. Cela a permis de s'assurer qu'elles suivaient la logique du système réel comme indiqué dans les processus lors de la conception du modèle. La validation a aussi été effectuée en discutant avec certains partenaires du secteur d'application pour s'assurer que tous les éléments essentiels du système réel sont présents.

5 ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans cette section, les résultats de la simulation pour les deux scénarios d'étude sur une période de deux ans sont d'abord présentés puis ensuite analysés et comparés. Les indicateurs présentés dans la section 4.3 sont utilisés dans cette comparaison.

Le Tableau 1 présente les pourcentages de variation des flux de matières alors que le Tableau 2 résume les pourcentages de variation des économies monétaires potentielles engendrées par l'intégration de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier.

	Variation des flux de matières (%)					
	Abrasifs épandus		Abrasifs collectés	Abrasifs enfouis	Abrasifs revalorisés	Abrasifs vierges achetés
	Neufs	Usagés				
Année 1	0	0	0	- 95,5	+ 3,6	+ 2,3
Année 2	- 5,8	+ 5,8	0	- 97,0	+ 2,3	- 3,5

Tableau 1 : Variation des flux de matières engendrés par une transition vers l'économie circulaire

	Variation des économies monétaires potentielles (%)			
	Achat abrasifs vierges	Opérations (balayage, transport, triage et fabrication)	Enfouissement	Total
Année 1	+ 2,9	+ 5,2	- 95,5	- 83,1
Année 2	- 2,9	+ 5,2	- 97,0	- 84,6

Tableau 2 : Variation des économies potentielles engendrées par une transition vers l'économie circulaire

En ce qui a trait aux flux de matières, les résultats du Tableau 1 indiquent une diminution significative du tonnage de balayures enfouies, de l'ordre de 96%. Ce résultat est logique et était attendu. En effet, l'ensemble des balayures collectées est envoyé à l'enfouissement dans le scénario linéaire actuel, alors que dans le scénario circulaire envisagé, il s'agit d'environ quatre pour cent en moyenne.

L'autre constat important concerne la proportion d'abrasifs revalorisée en abrasifs usagés grâce à l'ajout d'une portion d'abrasifs vierges achetés. Lors de la première année, la quantité d'abrasifs vierges achetée est inévitablement augmentée, puisque la totalité de la demande annuelle en abrasifs est achetée neuve et une portion est achetée en plus pour la fabrication des abrasifs usagés pour l'année suivante. Toutefois, lors de l'année suivante (et éventuellement celles à venir), les balayures collectées étant admissibles selon les normes au réemploi permettront de réduire l'achat d'abrasifs vierges. Considérant le faible taux de récupération du tonnage épandu lors du balayage printanier, le tonnage demeure limité dans l'étude de cas. Néanmoins, la situation serait tout autre avec des taux de récupération plus élevés. Bien que ce taux appert très élevé, Mokhbi et al. (2017) mentionne un taux moyen de récupération de 70%.

Évidemment, en plus des gains environnementaux engendrés par l'intégration de l'économie circulaire, les bénéfices monétaires sont considérables. Le coût d'enfouissement par tonne étant très important, la diminution significative de l'enfouissement des abrasifs collectés dans la chaîne de valeur circulaire réduit de beaucoup le coût total de ce scénario simulé. Il s'agit du facteur déterminant permettant de conclure que l'intégration de l'économie circulaire est avantageuse et donc souhaitable dans le domaine du balayage de rue printanier. Il convient cependant de noter que le coût d'enfouissement varie selon la contamination des balayures collectées. Dans les travaux ayant

mené à cet article, il a été supposé que la matière envoyée au lieu d'enfouissement ne pourra être revalorisée par ce dernier imposant ainsi un coût d'enfouissement élevé, et ce, à la fois dans le scénario linéaire que circulaire. Cette hypothèse entraîne à première vue des gains monétaires apparaissant démesurés. Évidemment, si le tarif s'avère être celui pour les balayures non contaminées, le pourcentage d'économies potentielles sera revu à la baisse même si des gains seront toujours présents. Pour ce qui est de l'utilisation des abrasifs usagés dans le scénario de la chaîne de valeur circulaire, à partir de la deuxième année, un peu moins d'abrasifs vierges nécessitent d'être achetés et les coûts y étant associés sont donc réduits. Les bénéfices concernant l'achat d'abrasifs vierges avec l'intégration de l'économie circulaire sont plutôt faibles, mais cela s'explique par le fait que la demande annuelle en abrasifs vierges est corrélée avec la quantité de balayures ayant été récupérée lors de la saison précédente. Enfin, concernant les coûts reliés à l'ensemble des opérations, ces derniers sont légèrement augmentés dans le scénario circulaire par rapport au scénario linéaire actuel. En effet, l'intégration de l'économie circulaire implique des opérations additionnelles, soit le triage des balayures collectées ainsi que le processus de fabrication des abrasifs usagés.

En somme, pour le cas étudié dans cet article, les résultats de la simulation indiquent que l'intégration de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier est une solution souhaitable. En effet, en plus des gains environnementaux observables à partir de la deuxième année d'exploitation de ce scénario, des économies monétaires considérables sont observées notamment dues à la réduction significative des coûts reliés à l'enfouissement.

6 CONCLUSION

Le balayage mécanique de rue effectué au printemps dans les pays nordiques entraîne actuellement l'enfouissement de plusieurs milliers de tonnes de balayures collectées. Ce processus linéaire a des effets environnementaux et monétaires négatifs considérables. L'implantation d'une économie circulaire dans cette filière par la revalorisation d'une partie des matières récupérées serait une solution économiquement viable comme démontré à l'aide du modèle de simulation présenté dans cet article. En effet, la diminution drastique des coûts d'enfouissement dans le scénario de la chaîne de valeur circulaire, due au détournement d'en moyenne environ 96% des balayures collectées, fait en sorte que le coût total du scénario circulaire est nettement inférieur à celui du modèle linéaire actuel.

L'étude décrite dans cet article est une étude préliminaire de nature exploratoire. Des travaux subséquents seront nécessaires pour mieux évaluer les différents bénéfices qui pourraient être retirés de la mise en œuvre de l'économie circulaire dans le domaine du balayage de rue printanier. La méthodologie employée pour analyser les scénarios de la chaîne de valeur linéaire et de la chaîne de valeur circulaire peut être généralisée afin d'étudier différents cas d'étude alternatifs de chaîne de valeur circulaire pour fins de comparaison. Il est donc envisagé de considérer notamment le cas des boulevards urbains, des routes de ville et des routes de campagnes. De plus, les distributions de probabilités utilisées dans le modèle pourront être revues lorsque de nouvelles bases de données seront générées. Également, le modèle de simulation sera enrichi afin d'intégrer le bilan carbone comme indicateur de performance afin de mesurer l'impact environnemental de l'intégration de l'économie circulaire dans cette filière. Il sera aussi pertinent de réaliser l'étude de simulation en projetant les résultats sur un horizon de plusieurs années. Finalement, une modélisation plus détaillée du système permettra de définir les rôles appropriés des différentes parties prenantes le long de la chaîne en vue d'évaluer leurs bénéfices individuels et ainsi déterminer le besoin d'incitatif pour supporter la mise en œuvre de l'économie circulaire.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été réalisée avec le soutien des Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies grâce à une bourse de maîtrise en recherche (dossier #273480). Nous aimerions également remercier nos divers collaborateurs, dont Arseno Balayage, le ministère des Transports du Québec, la ville de Trois-Rivières, Innofibre et Biopterre.

RÉFÉRENCES

Bag S et al., 2020. *Procurement 4.0 and its implications on business process performance in a circular economy*. Resources, Conservation & Recycling, 152.

Cong L et al., 2017. *Integration of dismantling operations into a value recovery plan for circular economy.* Journal of Cleaner Production, 149(15): 378-386.

Dev NK et al., 2020. *Industry 4.0 and circular economy: operational excellence for sustainable reverse supply chain performance*. Resources, Conservation & Recycling, 153.

Donovan H, 2005. *Winter street sand recycling program*. TAC-ATC Annual Conference, 18 au 21 septembre, Calgary, Canada.

Esbensen KH and Velis C, 2016. *Transition to circular economy requires reliable statistical quantification and control of uncertainty and variability in waste*. Waste Management & Research, 34(12), 1197-1200.

Fiona C et al., 2019. *Simulation to enable a data-driven circular economy*. Sustainability, 11(12).

Franco MA, 2019. *A system dynamics approach to product design and business model strategies for the circular economy*. Journal of Cleaner Production, 241.

Fulconis F et Philipp B, 2016. *Packaging et chaîne logistique en boucle fermée : contribution au passage d'une économie linéaire à une économie circulaire*. Logistique & Management, Taylor & Francis, 24:3-4: 186-198.

Genovese A et al., 2017. *Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications*. Omega, 66(B) : 344-357.

Hanumante N et al., 2019. *Assessment of circular economy for global sustainability using an integrated model*. Resources, Conservation and Recycling, 151.

Korhonen J et al., 2018. *Circular economy as an essentially contested concept*. Journal of Cleaner Production, 175, 544-552.

Korhonen J et al., 2018. *Circular Economy: The Concept and its Limitations*. Ecological Economics, 143, 37-46.

Lieder M et al., 2017. *Towards circular economy implementation: an agent-based simulation approach for business model changes*. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 31(6), 1377-1402.

Merli R et al., 2018. *How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review.* Journal of Cleaner Production, 178(20): 703-722.

Michael L et al., 2017. *Towards circular economy implementation in manufacturing systems using a multi-method simulation approach to link design and business strategy*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-18.

Mokhbi S et al., 2017. *Évolution des propriétés physiques des abrasifs routiers exposés à un cycle hivernal et perspectives de leur réutilisation*. Canadian Journal of Civil Engineering, 44(4): 286-297.

Mokwa R and Foster A, 2013. *Testing and evaluation of recovered traction sanding material*. The State of Montana Department of Transportation, FHWA/MT-13-003/8213.

Nestorovic M and Radicevic TD, 2019. *Transition to circular economy*. 41st International Scientific Conference on Economic and Social Development, Belgrade, 23-24 May 2019 : 203-209.

Nevrlý V et al., 2021. *Location of municipal waste containers: trade-off between criteria*. Journal of Cleaner Production, 278.

Pulley AK and Baird K, 2010. *Investigation of re-use options for used traction sand*. Colorado Department of Transportation, CDOT-2010-4.

Sariatli F, 2017. *Linear Economy versus Circular Economy : A comparative and analyzer study for Optimization of Economy for Sustainability*. Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development, vol. 6 : 31-34.

Sørensen PB, 2017. *From the Linear Economy to the Circular Economy: A Basic Model*. FinanzArchiv : Public Finance Analysis, Mohr Siebeck, Tübingen, vol. 74(1) : 71-87.

Tsiliyannis CA, 2019. *The cycle rate as the means for real-time monitoring of wastes in circular economy*. Journal of Cleaner Production, 227, 911–931.

Urbinati A et al., 2017. *Towards a New Taxonomy of Circular Economy Business Models*. Journal of Cleaner Production, 168, 487-498.

Weber C et al., 2020. *Food waste biorefinery advocating circular economy: bioethanol and distilled beverage from sweet potato*. Journal of Cleaner Production, 268.

Werning JP and Spinler S, 2020. *Transition to circular economy on firm level : Barrier identification and prioritization along the value chain.* Journal of Cleaner Production, 245, 118609 : 1-16.

Winans K et al., 2017. *The history and current applications of the circular economy concept.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68(1) : 825-833.

Xu X et al., 2018. *Circular economy pattern of livestock manure management in Longyou, China*. Journal of Material Cycles and Waste Management, 20(2), 1050-1062.

Yazan DM and Fraccascia L, 2020. *Sustainable operations of industrial symbiosis: an enterprise input-output model integrated by agent-based simulation*. International Journal of Production Research, 58:2, 392-414.

Ye B et al., 2020. *Process simulation and comprehensive evaluation of a system of coal power plant coupled with waste incineration*. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy.

Submission ID: 116

Response to Reviewers

Dear Conference Committee,

Thank you giving us the opportunity to submit a revised draft of the manuscript "MODELING PATIENT FLOW IN THE EMERGENCY DEPARTMENT USING MACHINE LEARNING AND SIMULATION" for publication in the 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation. We appreciate the time and effort that you and the reviewers dedicated to providing feedback on our manuscript and are grateful for the insightful comments and valuable improvements to our paper. We have incorporated most of the suggestions made by the reviewers. Please see below, in blue, for a point-by-point response to the reviewers' comments and concerns. All page numbers refer to the revised manuscript file with tracked changes.

Reviewer 1:

Author Comments: The paper proposes to improve patient flow within an emergency department thanks to the combination of machine learning and simulation.

Author response: Thank you!

I have several suggestions to improve the paper:

(1) There is a big problem in left column of page 2: it seems that a part of the paper was removed in the section, which begins as follows: "previous studies have shown stand-alone studies for prediction models..."

Author response: Thank you for pointing this out. This must had been done while editing the paper, and we have completed the paragraph.

The revised text reads as follows on left column of page 2:

"It is shown from previous studies they provided stand-alone studies for prediction models for patient admission to the hospital from the ED. The current study contributes to the literature of integrating ML with simulation by utilizing a prediction model within the simulation model to manage the patient flow in the ED. To the best of our knowledge, no available study has been performed that quantify the effect prediction models utilization within simulation for early diversion of predicted admitted patients from ED to IU on the LOS and DTDT".

(2) In section 3.1, the authors write that the probability distributions used in the simulation model 'were fitted from the historical records data and experts' opinion'. I suggest adding more details so as to convince the reader of the pertinence of such fitting.

Author response: We agree with the reviewer, however, as the focus of this study was to test the combination of ML with simulation, we have utilized the simulation model from a previous study (Cheatiou et al., 2020) and used the same simulation parameters.

(3) It is difficult to assess the quality of results displayed in Tables 2 and 3, since the paper does not include any comparison against competing algorithms available in literature. The

validity of the system proposed in the paper would be better proved if the paper could include a comparison against at least one competing system available in literature.

Author response: We think this is an excellent suggestion. We referred to a sort of similarity between the data in table 2 and the literature. For table 3, we added the performance measures from a recent study that seems to validate the results of the prediction model in the context of predicting admission from the ED.

These additions appear in page 3 (paragraph 2), page 4 (end of section 3), and page 4 (final paragraph of section 4).

(4) the paper includes several typos, such as:
'The current subsection use ML' instead of 'The current subsection uses ML' etc
The paper needs a complete and very careful proofreading.

Author response: Thank you for pointing this out. We agree with the reviewer and we have carefully reviewed and corrected the paper as much as possible.

(5) The list of references must be improved. For instance, last reference does not respect the same format as other references.

Author response: Thank you for pointing this out. The references have been reviewed according to the template.

Reviewer 2:

Author Comments: The context of this work and the use of simulation-based Machine learning are interesting, however there are some things to improve:

Author response: Thank you!

1. It is not clear how the accuracy, specificity and sensitivity (performance of prediction model) were calculated.

Author response: Thank you for pointing this out. We agree with the reviewer and have added the calculations to section 3.2 on right column of page 3.

2. What is the number of replications used to run the simulation model?

Author response: Thank you for pointing this out. We have used 10 replications and have added this to section 3.1.

3. In section 3.2, the authors indicate that the decision tree model 2 exclude only the X-Ray and Lab test from input features. Then, in Figure 5, they present the decision tree model noting that only four of the input features (Age, registration date, registration time, and

sex) were used. Why the patient acuity level does not exist with this input features. Was it excluded in the pruning step? This should be explained!

Author response: Thank you for pointing this out. We agree that this point it is needed to explain that actual variables used in the construction excluded the triage level. We have referred to that in the beginning of section 4.

4. The assessment of quality of services through the minimization of average length of stay (LOS) and Door to doctor time (DTDT) is just a portion of many other components that are part of the quality of services term.

Author response: Thank you for your point. We agree with the reviewer that other measures could be used to measure the quality of service in the ED. However, we have focused the current study to only LOS and DTDT due to the ease of calculations in the current simulation model and their clear interpretation.

5. The authors refer to section 4 (topics: "Introduction" and "Simulation model"), but this section is not present in this text.

Author response: Thank you for your point. We have added the missing title for section 4 with a title “Results and Discussion”.

6. Respect the format of MOSIM template (references are left aligned instead of justified)

Author response: Thank you for pointing this out. The references have been reviewed according to the template.

7. It is recommended a revision of the correct use of English language and grammar

Author response: Thank you for pointing this out. We agree with the reviewer and we have carefully reviewed and corrected the paper as much as possible.

8. Check for common mistakes related to grammar:
• The author uses the abbreviation of a word once and other times the complete word. Either the abbreviation or the full word must be used (e.g., Machine Learning (ML), Emergency Department (ED), Door to doctor time (DTDT)).
• The abbreviation of a word is made at the first appearance. No need to repeat it every time.
• Minutes instead of min.
• Begin with a capital letter the last paragraph in the introduction (Previous studies.)
• Pay attention to punctuation in sentences and use of commas.

Author response: Thank you for pointing this out. We agree with the reviewer and we have carefully corrected the referred mistakes and reviewed the punctation as much as possible.

MODELING PATIENT FLOW IN THE EMERGENCY DEPARTMENT USING MACHINE LEARNING AND SIMULATION

Emad Alenany
State University of New York at Binghamton, USA
ealenan1@binghamton.edu

Abdessamad Ait El Cadi
LAMIH UMR CNRS 8201, Université Polytechnique Hauts-de-France (UPHF), Valenciennes, France
Abdessamad.AitElCadi@uphf.fr

ABSTRACT: *Recently, the combination of machine learning (ML) and simulation is gaining a lot of attention. This paper presents a novel application of ML within the simulation to improve patient flow within an emergency department (ED). An ML model used within a real ED simulation model to quantify the effect of detouring a patient out of the ED on the length of stay (LOS) and door-to-doctor time (DTDT) as a response to the prediction of patient admission to the hospital from the ED. The ML model trained using a set of six features including the patient age, arrival day, arrival hour of the day, and the triage level. The prediction model used a decision tree (DT) model, which is trained using historical data achieves a 75% accuracy. The set of rules extracted from the DT are coded within the simulation model. Given a certain probability of free inpatient beds, the predicted admitted patient is then pulled out from the ED to inpatient units to alleviate the crowding within the ED. The used policy combined with adding specific ED resources achieve 9.39% and 8.18% reduction in LOS and DTDT, respectively.*

KEYWORDS: *Healthcare systems, Emergency department, Simulation, Machine learning techniques, management.*

1 INTRODUCTION

The hospital system is a network of interconnected units: ED, intensive care unit (ICU), operating rooms (OR), and inpatient nursing units (NU) (Kolker, 2013). EDs face significant challenges regarding patient delay and safety (Yarmohammadian et al., 2017). A significant portion of admission to different hospital inpatient units (IU) is coming from the ED (Morganti et al., 2013). Given the scarce ED resources, a significant amount of research has been done to investigate methods to decrease the length of stay and streamline flows at EDs.

ED overcrowding could lead to adverse results on patient safety (Cameron, 2006). Therefore, many mechanisms have been developed to mitigate the ED overcrowding as studying different process changes and their effects through simulation (e.g., Hussein et al., 2017). Yarmohammadian et al. (2017) provide a review of different strategies to deal with ED overcrowding. The strategies adopted include patient streaming, fast track, and team triage, among others.

Ghanes et al. (2015) present a simulation optimization for resource staffing in the ED. The objective is to minimize the average LOS subject to the limit on the DTDT for most severe patients and budget constraints. The authors performed a sensitivity analysis and showed the tradeoff between LOS and DTDT. Yousefi et al. (2018) provide resource allocation optimization for an ED by developing a meta-model using an ensemble of adaptive network-based fuzzy neuro inference systems, feed-forward neural network, and recurrent neural network. Then, they used a genetic algorithm to optimize the objective function generated from the metamodel. Rabbani et al. (2018) Solve the simulation optimization resource allocation problem for an integrated model of an ED with pharmacy, and lab using artificial neural networks and data envelopment analysis.

The use of machine learning in conjunction with simulation models is gaining a lot of attention in the last few years (Greasley and Edwards, 2019). Greasley and Edwards (2019) present a recent review for studies of combining simulation with big data analytics. Greasley (2019) describes ways of combining simulation with ML. Lee et al. (2015) is considered one of the first studies to combine ML, simulation, and optimization to improve ED operations. In their study, the authors utilized patient characteristics, demographics, hospital operations, socioeconomic status, clinical information, and disease behavioral patterns to predict patient ED readmission. Gartner and Padman (2020) studied the factors associated with the perception of waiting time, i.e., under, over, or correct estimation of the waiting times. Then, they used ranking and selection methods to identify the importance of such features. Through using different machine learning classification algorithms, they have achieved 70% and 78% for correctly classifying a specific patient to be overestimating his waiting time in the waiting area and the treatment room, respectively. The authors then fed a simulation model with the results from the classification model to test the effects of different staff changes on patient satisfaction.

With ML and data mining tools become widely used, researchers have studied the potential of those tools to predict patient admission from the ED toward better management of patient flow in the ED. A recent review of ML applications in the ED is given in (Shafaf and Malek, 2019). Cameron et al. (2015) present a logistic regression model to anticipate the likelihood of admission at the triage point. They used two years of regularly collected data from hospitals in Galacso. The authors found the highest important indicators are "triage classification, age, National Early Warning Score, appearance by rescue vehicle, referral source, and admission within the last year" (Cameron et al., 2015). They achieve an area under the curve of the operating characteristic curve (AUC-ROC) of 0.877. Graham et al. (2019) provided a comparison between three ML models to predict patient admission from ED: logistic regression, decision tree, and gradient boosting machines. The authors achieve an accuracy of 79.94% and an AUC-ROC of 0.849. Liu et al. (2019) used a deep belief network (DBN), k-nearest neighbor (kNN), and artificial neural network for classification of ED patients attendance/disposal from the ED. They have identified 5 different classes of patients: inpatient admission, discharged with follow-up needed, fracture clinic referral, outpatient clinic referral, and transfer to another healthcare entity. They achieved 76.20% accuracy using DBN.

It is shown from previous studies they provided stand-alone studies for prediction models for patient admission to the hospital from the ED. The current study contributes to the literature of integrating ML with simulation by utilizing a prediction model within the simulation model to manage the patient flow in the ED. To the best of our knowledge, no available study has been performed that quantify the effect prediction models utilization within simulation for early diversion of predicted admitted patients from ED to IU on the LOS and DTDT.

The remainder of this paper goes as follows. Section 2 presents a system description for the ED under consideration, while section 3 presents the methodology including simulation and prediction models. Results and discussions are shown in section 4. Finally, section 5 presents conclusions and future work.

2 SYSTEM DESCRIPTION

The ED system considered here is recently studied in (Cheaitou et al., 2020). The patient flow at the ED is shown in Figure 1. A typical patient trajectory starts with the triage process where the arriving patient goes for the triage by a triage nurse. After triage, patients are categorized into one of five severity levels (Ward, 2006). The most severe is level 1, which they need prompt care, while level 5 is the least critical. Critical patients (level 1) goes on for first aid. Then, all patients do diagnostic tests (radiology and/or lab tests) if necessary. Next, needed patients pass by a complementary treatment step, and later they are either discharged to home, admitted to hospital inpatient units, or transferred to another hospital.

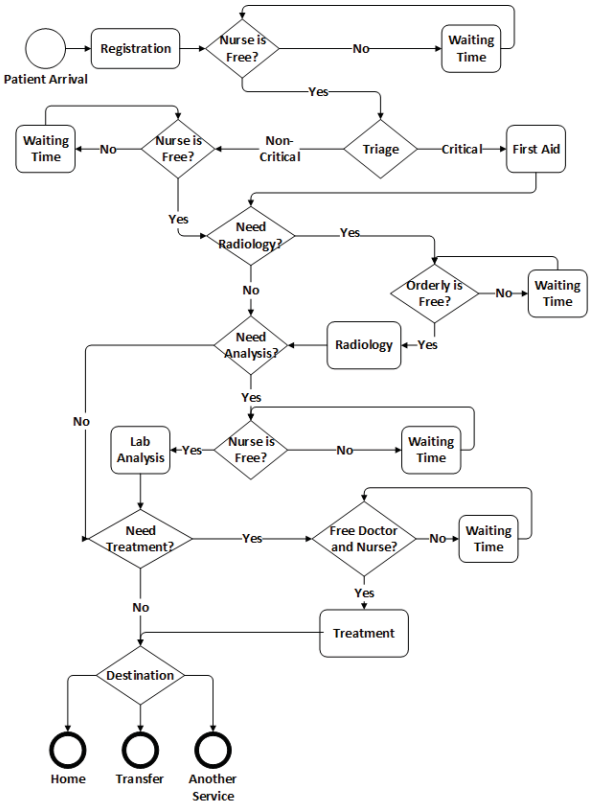


Figure 1 patient flow in the ED system

The ED system works for two shifts with different resource schedules. The first shift from 08:00 am to 04:00 pm with three physicians (two Emergency specialists + one Resident), seven Registered Nurses, two Orderlies, and two Receptionists. The second shift starts at 04:00 pm to 08:00 am and has four physicians (one Emergency specialist + three Residents), seven Registered Nurses, two Orderlies, and two Receptionists. For the radiology technicians, they work on two shifts: 7:00 am-7:00 pm (4 technicians), and 7:00 pm to 7:00 am (two technicians).

3 METHODOLOGY

This section describes the simulation and prediction models and their constituents.

3.1 Simulation model

The probability distributions used in the simulation model for the arrival and different service processes are shown in table 1. They are fitted from the historical records data and experts opinion (Cheaitou et al., 2020). The simulation is developed using Rockwell Arena simulator V15. The simulation run length is set to 1 year with 5 days as a warm-up period and 10 replications. The LOS is considered the main key performance indicator for the ED system in this study. The average LOS from the simulation is found to be 98.68 minutes, while the average

actual LOS is 100 minutes, which seems reasonable to validate the model.

Parameters	Distribution functions of random variables (minutes)
Arrival rate	Exponential(24)
Registration time	Uniform(3,10)
Triage time	Triangular(5, 10, 15)
First Aid for PICU cases	Uniform(10,45)
First Aid for ICU cases	Uniform(20,60)
First Aid for CCU cases	Uniform(30,90)
Complementary tests durations: laboratory	Triangular(15, 45, 90)
Complementary tests durations: radiology	Triangular(15, 45, 90)
Complementary Treatment	Uniform(10,60)

Table 1: Simulation parameters

Using the validated simulation model, a few scenarios of adding resources are tested to improve patient LOS. There are three tested scenarios. The baseline scenario reflects the simulation model of the original ED system. Other scenarios include adding one more nurse to reduce the waiting times during the treatment phase (scenario A). Another is adding one more nurse in addition to one more orderly (Scenario B). The motivation for Scenario B is there has been a lack of orderlies required for the radiological examination. The results are given in section 4.

3.2 Predicting hospital admission from the ED within simulation

The successful prediction of ED patients as becoming inpatients could help to better patient flow management. Also, it could help reduce ED congestion by avoiding the excessive use of scarce ED resources.

The current subsection uses ML to predict patient hospital admission from the ED. The prediction model is trained on generated data using DT and kNN algorithms. Then, the trained prediction model is implemented within the simulation model to predict the patient admission status given the specific set of patient characteristics: admission status, gender, age, arrival day, arrival hour, triage level, and having X-Ray or Lab tests or not. If the patient is predicted to move to an IU, the patient will be directed to IU and removed from the ED given available beds at the IU. Figure 4 shows the flowchart with the proposed changes to the simulation model.

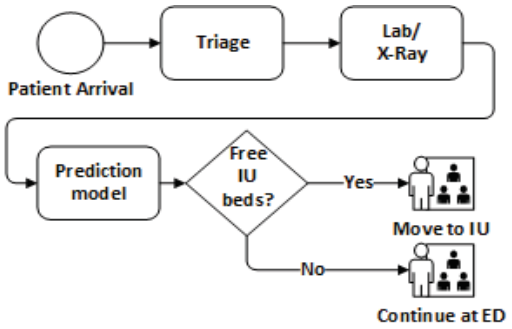


Figure 4 Integration of simulation and prediction model

The prediction model methodology includes data generation, training, and testing. Here DT and kNN are selected as the prediction model for their common use in previous studies for the same problem. They were also found to achieve effective results compared to other tested models. The trained model is integrated into the simulation. This is done by translating the DT rules into Visual Basic for Applications (VBA) code within the Arena simulation model.

The data generated for the different features are inspired by the summary statistics given in recent studies (e.g., Graham et al., 2018). A number of 500 patient records with six features are generated. Table 2 shows summary statistics for generated patient records to the ED used in the prediction model construction. The rate of admitted/non-admitted patients of the generated data is like other studies (e.g., Graham et al., 2018 and references therein).

The accuracy, specificity, and sensitivity are used to assess the prediction model performance. Given the information about the actual and predicted status for patients, these measures calculated as follows (Baratloo et al., 2015):

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \quad (3)$$

where

True-positive (TP) = the number of times a patient correctly predicted as admitted

False-positive (FP) = the number of times a patient incorrectly predicted as admitted

True-negative (TN) = the number of times a patient correctly predicted as not admitted

False-negative (FN) = the number of times a patient incorrectly predicted as not admitted

The data is then divided into training and testing with 70% and 30%, respectively. The prediction model is done using 'tree' and 'class' libraries in R for DT and kNN models, respectively. Table 3 shows the performance of different prediction models using DT and kNN. The first DT model (DT1) used all the patient features including X-Ray/Lab test. It achieves high accuracy and specificity of 0.81 and 0.89, respectively. However, sensitivity is only 35%. The second DT (DT2) model excludes the X-Ray/Lab test feature. DT2 has the incentive to predict for the patient admission status from an earlier point, which is directly after the point of triage. This model achieves an accuracy of 0.75. Using a kNN model with only two numeric features, age, and arrival hour of the day, with the number of neighbors, k = 1, the achieved accuracy is 0.74, and sensitivity 0.40. The high difference between specificity and sensitivity of the models used could be attributed to the imbalance between admitted/non admitted records in the dataset (Graham et al., 2018). Increasing the sample size and using specific methods to handle data imbalance would be tested in a future study.

As a validity to the reported performance of the DT model of this study, the last row of table 4 shows the reported performance from a recent study (Graham et al., 2018). Graham et al. (2018) reported 0.80, 0.90, and 0.53 for the accuracy, specificity, and sensitivity, respectively. The results seem close to the DT used in this study, with a higher sensitivity result.

4 RESULTS AND DISCUSSION

Figure 5 shows the decision tree for the DT2 model. The triage level is included in the input variables, however, it is not included in the construction of the tree by the decision tree algorithm. The DT prediction models used only four of the input features: age, registration date, registration time, and gender. The first branch in DT 2 splits the tree based on the patient Age, which indicates that Age is the most important predictor for patient admission status. This result agrees with reported results of other studies (e.g., Sun et al., 2011).

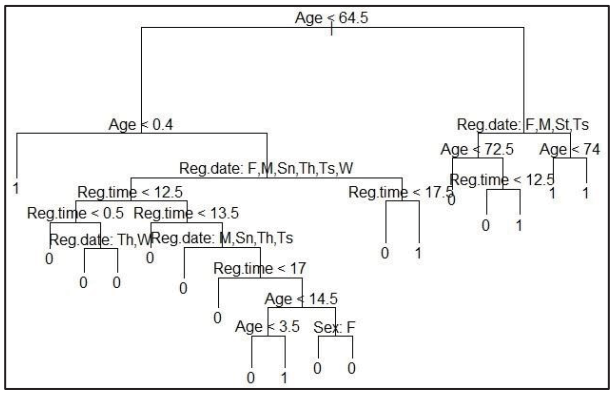


Figure 5 Tree plot of the DT2 model

Feature	Main Categories	% per category
Admission	Yes No	20.1 79.9
Gender	Female Male	51.9 48.1
Triage	L3 L4	49.4 48.2
X-Ray	Yes No	54.4 45.6
Lab	Yes No	52.2 47.8
Age	Mean SD	31.7 24.4
Arrival day	Friday Sunday Tuesday Wednesday	21.4 17.7 17.5 20.9
Arrival hour	4 pm 5 pm 6 pm 7 pm 9 pm 10 pm	6.7 6.3 7.7 5.8 6.7 6.3

Table 2 Summary statistics of generated patients records

	Accuracy	Specificity	Sensitivity
DT1	0.81	0.89	0.35
DT2	0.75	0.88	0.26
kNN (k=1)	0.74	0.79	0.40
Graham et al. (2018) DT	0.80	0.90	0.53

Table 3 Summary of the prediction models performance

The following set of rules are extracted from DT2 model to predict admission a specific patient:

1. Patients with $Age < 0.4$ years old.
2. Patients with $Age < 64.5$ and $Age > 0.4$ years old who arrive after 5:30 pm on Saturday.
3. Patients with $Age > 3.5$ and $Age < 64.5$ years old who arrive after 5:00 pm on Wednesday or Friday.

4. Patients with $Age > 64.5$ and $Age < 74$ who arrive on Sunday, Wednesday, or Thursday.
5. Patients with $Age > 72.5$ and arrive on Friday, Saturday, Monday, or Tuesday and arrive at 12:30 pm or later during the day.

The rules are coded with VBA within the simulation model. Table 4 presents the simulation results for the three scenarios described in the previous section, in addition to the inclusion of ML with each scenario. The average LOS is presented, along with the DTDT. The DTDT time represents the time to first treatment by a doctor in the ED for critical patients (Ghanes et al., 2015).

Using the "Baseline+ML" scenario improves the LOS and average DTDT by 3.66% and 1.61%, respectively. Using "scenario A", LOS and DTDT improves by 5.46% and 7.49%, respectively. However, combining ML with "scenario A" (scenario A+ML) leads to higher LOS and DTDT reduction compared to "scenario A". The LOS and DTDT could be reduced by 8.53% and 8.14% relative to the baseline scenario in "scenario A+ML". Similar results could be obtained in "scenario B+ML", where expected improvement to the patient logistical flow in the ED from adding more resources is enhanced using the ML model. All scenarios are statistically significant relative to the baseline scenario.

5 CONCLUSIONS

This study provided a novel application of combining ML with a simulation model for a real ED to model the ED patient flow. ML is used in the form of a prediction model to anticipate whether the ED patient would be finally admitted to the inpatient unit after going through treatment at the ED. With the output from the ML model, the simulation model is used to assess the expected reduction in patient LOS and DTDT if those patients are admitted directly to inpatient units at an early stage of their ED journey, given an available inpatient bed.

A decision tree model is trained to predict whether an arriving patient will be admitted to the hospital given a specific set of patient data includes age, registration date, registration time, and gender. The extracted rules from the trained model are then coded into the simulation model. The results show that the expected decrease in LOS and DTDT could lead to a reduction of more than 9% and 8% in the patient LOS and DTDT, respectively.

This research shows the potential of using ML and simulation for better ED patient flow management to alleviate ED congestion. Future work would include increasing the data size used for the ML model training. Also, handling the data imbalance in the class variable (Admitted vs. Not admitted). Other ML models could be considered to enhance the performance as well. This study focused on LOS and DTDT measures due to the direct implementation in the current simulation model. The effect of other related measures on patient quality should be considered as well.

Scenario	LOS (minutes, % decrease)	DTDT (minutes, % decrease)
Baseline	98.68	19.04
Baseline+ ML	95.64* (-3.66%)	18.73* (-1.61%)
Scenario A	93.29* (-5.46%)	17.62* (-7.49%)
Scenario A+ML	90.26* (-8.53%)	17.49* (-8.14%)
Scenario B	92.15* (-6.62%)	17.62* (-7.44%)
Scenario B+ML	89.41* (-9.39%)	17.48* (-8.18%)

Table 4 Simulation results of the baseline, scenario A, and scenario B with/without the ML model. * t-test significant at $p < 0.05$

REFERENCES

Baratloo, A., Hosseini, M., Negida, A., & El Ashal, G., 2015. Part 1: Simple Definition and Calculation of Accuracy, Sensitivity and Specificity. *Emergency (Tehran)*, *3*(2), 48–49.

Cameron, A., Rodgers, K., Ireland, A., Jamdar, R., & McKay, G. A., 2015. A simple tool to predict admission at the time of triage. *Emergency Medicine Journal*, 32(3), 174–179.

Cameron, P. A., 2006. Hospital overcrowding: A threat to patient safety? *Medical Journal of Australia*, Vol. 184, pp. 203–204.

Cheaitou, I., Ait El Cadi, A., Bekrar, A., Duvivier, D., & Sahili, A., 2020. Modeling and simulation of patient flow at the emergency services: Case of Al-Zahraa Hospital University Medical Center in Lebanon. *10ième Conférence Francophone En Gestion et Ingénierie Des SystEmes Hospitaliers*.

Gartner, D., & Padman, R., 2020. Machine learning for healthcare behavioural OR: Addressing waiting time

perceptions in emergency care. *Journal of the Operational Research Society*, 71(7), 1087–1101.

Ghanes, K., Jouini, O., Diakogiannis, A., Wargon, M., Jemai, Z., Hellmann, R., … Koole, G., 2015. Simulation-based optimization of staffing levels in an emergency department. *Simulation*, 91(10), 942–953.

Gonzalez Morganti, Kristy, Sebastian Bauhoff, Janice C. Blanchard, Mahshid Abir, Neema Iyer, Alexandria Smith, Joseph Vesely, Edward N. Okeke, and A. L., 2013. *The Evolving Role of Emergency Departments in the United States*.

Graham, B., Bond, R., Quinn, M., & Mulvenna, M., 2018. Using Data Mining to Predict Hospital Admissions from the Emergency Department. *IEEE Access*, 6, 10458–10469.

Greasley, A. (2019). Simulating Business Processes for Descriptive, Predictive, and Prescriptive Analytics. In *Simulating Business Processes for Descriptive, Predictive, and Prescriptive Analytics*.

Greasley, A., & Edwards, J. S. (2019). Enhancing discrete-event simulation with big data analytics: A review. *Journal of the Operational Research Society*, *0*(0), 1–21.

Hussein, N. A., Abdelmaguid, T. F., Tawfik, B. S., & Ahmed, N. G. S., 2017. Mitigating overcrowding in emergency departments using Six Sigma and simulation: A case study in Egypt. *Operations Research for Health Care*, 15, 1–12.

Kolker, A., 2013. Interdependency of Hospital Departments and Hospital-Wide Patient Flows. *In R. Hall (Ed.), International Series in Operations Research and Management Science* (Vol. 206, pp. 273–309).

Lee, E. K., Atallah, H. Y., Wright, M. D., Post, E. T., Thomas, C., Wu, D. T., & Haley, L. L. (2015). Transforming hospital emergency department workflow and patient care. *Interfaces*, *45*(1), 58–82.

Liu, W., Wang, Z., Hu, L., & Liu, X., 2019. A Deep Learning Approach for Classifying Patient Attendance Disposal from Emergency Departments. *IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA*, 2019-July, 278–283.

Rabbani, M., Farshbaf-Geranmayeh, A., & Yazdanparast, R., 2018. A simulation optimization approach for integrated resource allocation in an emergency department, pharmacy, and lab. *Intelligent Decision Technologie*s, 12(2), 187–212.

Ripley, B., 2018. "tree" Classification and Regression Trees. *R Package Version 1.0-39*.

Shafaf, N., & Malek, H., 2019. Applications of Machine Learning Approaches in Emergency Medicine; a Review Article. *Archives of Academic Emergency Medicine*, 7(1), 34.

Sun, Y., Heng, B. H., Tay, S. Y., & Seow, E., 2011. Predicting Hospital Admissions at Emergency Department Triage Using Routine Administrative Data. *Academic Emergency Medicine*, *18*(8), 844–850.

Venables, W., & Ripley, B., 2002. *Modern Applied Statistics with S (4th ed.)*.

Ward, D. E., 2006. Classification of groups. *Journal for Specialists in Group Work*, *31*(2), 93–97.

Yarmohammadian, M. H., Rezaei, F., Haghshenas, A., & Tavakoli, N., 2017. Overcrowding in emergency departments: A review of strategies to decrease future challenges. *Journal of Research in Medical Sciences*, Vol. 22.

Yousefi, M., Yousefi, M., Ferreira, R. P. M., Kim, J. H., & Fogliatto, F. S., 2018. Chaotic genetic algorithm and Adaboost ensemble metamodeling approach for optimum resource planning in emergency departments. *Artificial Intelligence in Medicine*, 84, 23–33.

13the International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'20 – November 12-14, 2020- Agadir – Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

INVESTIGATING THE USE OF A MODEL-BASED APPROACH TO ASSESS AUTOMOTIVE EMBEDDED SOFTWARE SAFETY

Yandika SIRGABSOU
LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, INSA Toulouse
Renault Software Labs
Toulouse, France
yandika.sirgabsou@renault.com

Claude BARON
LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, INSA Toulouse
ISAE-Supaéro
Toulouse, France
claude.baron@laas.fr

Cyril BONNARD
Groupe Renault
Renault Software Labs
Toulouse, France
cyril.bonnard@renault.com

Laurent PAHUN
Groupe Renault
Renault Software Labs
Toulouse, France
laurent.pahun@renault.com

Lorenzo GRENIER
INSA Toulouse
Université de Toulouse
Toulouse, France
grenier@etud.insa-toulouse.fr

Philippe ESTEBAN
LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, Université Toulouse 3
Toulouse, France
philippe.esteban@laas.fr

ABSTRACT: *With autonomous driving, vehicles are undergoing tremendous and multiple innovations in a variety of areas of automotive expertise. In particular, the amount of software used in embedded safety-critical systems is increasing at a rapid rate to implement new features. It is therefore essential today to guarantee the safety of software by carrying out safety analyses in accordance with automotive standards. These analyses allow engineers assessing the design with regard to safety and to determine the modifications if needed to meet safety objectives. However, the traditional approach to perform these analyses is cumbersome and limited when faced with the complexity of today's automotive software architectures. Safety analyses are currently performed manually, and the results are dependent on the experience of the safety expert. As a result, they are highly subjective and are not guaranteed to be exhaustive and error-free. To overcome these issues, this paper explores the use of a model-based safety approach in the context of safety-critical automotive embedded software. It makes a methodological proposal that relies on the software architecture model to build a dedicated safety model from which safety analyses can be automatically derived. The method is experimented on an automotive case study, an embedded software that assists the driver in following the lane.*

KEYWORDS: *Automotive, embedded software, safety-critical systems, model, software engineering, MBSA, MBSE*

1 INTRODUCTION

In our society undergoing deep technological and societal changes, vehicles (cars, drones…) are becoming more and more autonomous. Their architecture involves several cyber-physical systems that massively embed software components in order to allow this autonomy. In this context, there is a societal need to ensure and guarantee the vehicles safety, therefore the systems and software safety.
In the automotive domain, software safety analyses are currently based on traditional manual techniques. Generic quality-oriented standards are used as references, and the quality of the analyses mostly depends on the experience of safety experts. Safety analyses are not really formalized, do not allow even a partial reuse and sometimes offer approximate guarantees of safety. With regard to this evolving context, it is therefore necessary to improve current industrial practices in order to better respond to the societal and economic issues.
On another side, the current trend in engineering is to adopt model-based approaches. They enable formalizing analyses, a better communication and collaboration between interdisciplinary teams, rapid prototyping and simulation, and improve reuse. Using model-based approaches to assess software safety thus seems promising as it would help addressing the current issues that are related to safety-critical software analysis.
Therefore, the objective of this paper is to explore the possibility of using a model-based approach to perform safety analyses on embedded automotive software. To this goal, this paper first gives an overview of model-based methods and underlines their interest in software engineering and safety assessment. It compares the state of scientific knowledge with respect to the state of industrial practices in the field of automotive software engineering in order to identify areas for improvement, in the practice of software safety analysis. We make a methodological proposal, which consists in automating the production of software safety analyses from a purposely built safety model. Then we give the results obtained from the application of the proposal on a real-world case study, the lateral control software component which is part of the autonomous driving software and whose role is to keep the vehicle in lane. We finally indicate some interesting research avenues to further develop this work.

2 MODEL-BASED APPROACHES IN SOFTWARE ENGINEERING AND SAFETY

The growing systems complexity requires the implementation of development methods to keep costs, time and quality under control. Traditional, document-centric and

test-based approaches are not sufficient enough for the development of multi-disciplinary and distributed smart systems. Model-based (or model-driven) approaches address this complexity with a model-centric, frontloaded engineering methodology that focuses on creating and exploiting domain models as the primary means of information exchange between engineers, rather than on document-based information This section quickly reminds the principles and interests of model-based approaches in software engineering then presents their use in the context of safety analyses.

2.1 Model-Based Software Engineering

Model-Based Systems Engineering (MBSE) is defined as "the formalized application of modeling to support system requirements, design, analysis, verification and validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life cycle phases [1][2]. This definition is also applicable to software engineering, where MBSE[1] has been proposed as a promising software development methodology to overcome limitations of traditional programming-based methodology [3]. MBSE promotes the use of modeling languages for describing software in an abstract way; it is used for modeling requirements, functional and physical architectures, but it also supports simulation, code generation and verification by providing means for automatically generating different development artifacts, e.g. code and documentation, from models.

2.2 Model-Based Safety Assessment

According to Joshi et al. [4], Model Based Safety Analyses (MBSA[2]) is the application of the MBSE techniques to support safety analysis. However, whereas MBSE models the nominal (non-failure) functional behavior of a system, MBSA models its fault (dysfunctional) behavior. Indeed, safety analyses aim at identifying whether the system, as modeled, has weak points. They can be performed either to analyze if a system component failure can induce a serious failure at the system level, or to determine what are the possible root causes of a system failure. To this goal, the safety engineers draw their conclusions from traditional models such as respectively FMEA[3]s or FTA[4]s that they manually elaborate from the available system specification and design artefacts resulting from design stage.

Adopting a model-based approach in safety engineering consists in building a dysfunctional model of the system that shows the system behavior in case of a failure (reasoning by failure propagation), from which the traditional analyses (minimum cuts[5], FTAs and FMEAs) can be derived [6]. This notably allows an easy and quick generation of new safety analyses in case the system architecture evolves, therefore reduces the cost and improves the quality of the safety analysis process.

2.2.1 MBSA Methods

MBSA methods can be classified according to two main criteria, the dysfunctional model construction and the semantics of component interfaces.

The first criterion is related to the process for defining the safety model and its relationship with the system design model: the dysfunctional model can either be an extension of the design model or a dedicated model [7]. We find in [4] an example of an extended model, where a nominal functional model is first constructed during design to which failure modes are added for the purpose of safety analysis. The key advantage of the model extension approach is the consistency, by construction, of the safety analyses and the design model of the system. Furthermore, development and safety processes can share a common modeling environment, languages and tools [7]. However, it has some drawbacks. One is that it does not allow independence between the system and safety models. In the case of a dedicated model, a distinct 'standalone' dysfunctional model is built by the safety engineer based on his understanding of available information from design documents and functional models. The key advantages of this approach are that it is more pragmatic to implement, as it ensures independence and separation of concern (between safety and engineering disciplines). However, one of its drawbacks is that it requires supplementary means for ensuring consistency with the design model.

The second criterion is related to the dysfunctional model semantics (components behavior) and the type of information that is conveyed through the component interfaces, either nominal or failure flows [7]. This criterion leads to distinguishing Failure Logic Modeling (FLM) [6][8] (that uses failure flows) and Failure Effect Modeling (FEM) [6] (that uses nominal flows). Early proposals adopted the FEM approach [4] but, as the discipline evolved, FLM has gained prevalence and most of the pioneering MBSA methods such as FPTN [6], HiP-HOPS [9] and AltaRica [10] rely on it.

Several modeling languages support MBSA. Some are dedicated to safety such as AltaRica [13], SAML [14] or Figaro [15]. Others are multipurpose modeling languages (such as UML) and architecture description languages (such as AADL [16] or EAST-ADL [17]) that extend their core semantics and syntaxes to support safety analyses trough profiles and error annexes [12] .

2.2.2 AltaRica language

AltaRica [19] is a high-level modeling language dedicated to risk analysis that supports safety, reliability and

[1] In this paper, the S in MBSE would either stand for System or Software.
[2] The A in MBSA either means Analyses or Assessment.
[3] Failure Modes and Effects Analysis. FMEAs are systematic bottom-up safety analyses to study the effects of every single failure condition (a feared event) on the whole system.
[4] Fault Tree Analysis. FTA is a graphical tool to explore the causes of system level failures. It uses Boolean logic to combine a series of lower level events and it is basically a top-down approach to identify the component level failures (basic event) that cause the system level failure (top event) to occur.
[5] Minimum cuts represent the smallest combination in which basic events can possibly cause a system failure; they are used intermediately in the generation of certain FTAs. Cut sets are the unique combinations of component failures that can cause system failure. A cut set is said to be minimal if, when any basic event is removed from the set, the remaining events collectively are no longer a cut set [5].

performance analyses [10]. In AltaRica, model elements are expressed in terms of nodes. Each node is composed of states, events, transitions and assertions [20]. States are declared using domains. A domain is an enumerate comprising several states. Several tools currently support AltaRica: OCAS [13], Simfia and SimfiaNeo [23], Open AltaRica [24] and AltaRica Studio [25].
In conclusion, among the current MBSA methods, we found that using a dedicated model and FLM approaches reveals to be the most interesting, as it adopts a safety oriented modeling; when combined with a dedicated model, this ensures independence between system design and safety (which is an important criterion in the certification of critical systems). For the case study analysis, we chose AltaRica for its simplicity and proven usefulness in the system context. However, if AltaRica is well-adapted to software failure modeling remains to be clarified.

3 AUTOMOTIVE PRACTICES IN SOFTWARE ENGINEERING AND SAFETY ASSESSMENT

3.1 A document-based software development process

The automotive software development process is centered around two standards: ASPICE [32] (for quality) and ISO 26262 [33] (for functional safety). ASPICE (Automotive Software Performance Improvement and Capability dEtermination) is a standard that provides guidelines to improve software development processes and to assess suppliers. ISO 26262, the "Road Vehicles-Functional safety" is the standard for functional safety of electrical and/or electronic systems in automotive production. It provides a reference for the automotive safety lifecycle. It also defines the Automotive Safety Integrity Level (ASIL), representing the degree of automotive hazard and the degree of rigor to apply in specifying and implementing safety requirements and safety measures. ASILs range from A to D, with D representing the most stringent and A the least stringent level, while QM (Quality Management) is allocated to items that have no impact on safety. ISO26262 is divided into 11 parts; Part 6 addresses the product development at software level (which is more specific to software engineering context).
Figure 1 shows the ISO26262 phase model for the product development at the software level. The left side of the cycle covers the 'Specification of the software safety requirements', the 'Software architectural design', and the 'Software unit design and implementation' phases. The software safety requirements usually are non-formalized, expressed in natural language and managed through tools such as Rational DOORS. At the software architectural design phase, the use of semi-formal modeling language (such as UML) to support design and analysis remains quite immature and unmastered. As a result, the software architectural design process mostly relies on informal models and natural language descriptions. However, at the software unit design phase, tools like Simulink are effectively used for prototyping, simulation and code generation.

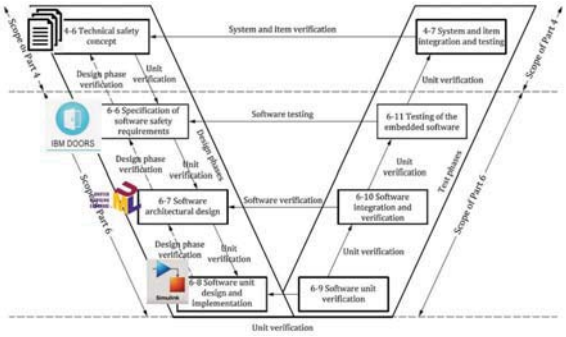


Figure 1. Reference phase model for the product development at the software level from [33]

On the right side of the cycle feature the 'Software unit verification", 'Software integration and verification' and 'Testing of the embedded software' phases. Each of these phases aim to verify and validate if the corresponding left side (design stage) phases are implemented as required. Traceability is maintained between related phases as shown by the arrows on Figure 1.

3.2 A document-based safety assessment process

In the current practices in automobile, a document-based safety assessment process is conducted as the integral part of the design process and is done in compliance with ISO 26262. The process comprises the manual construction of safety cases and safety analyses in document templates (in Excel, Word, PowerPoint format). Unfortunately, these analyses are highly subjective and dependent on the skill of the engineer. Their traceability back to design artifacts is mainly maintained through naming conventions and sometimes hyperlinks in collaborative tools. The final FTAs are often produced through a process of review and consensus building between the system and safety engineers [34]. Even after a consensus is reached, it is unlikely that the analysis results will be complete, consistent, and error free due in part to the informal models used as the basis of the analysis. In fact, the lack of precise models of the system architecture and its failure modes often forces the safety analysts to devote much of their effort to gathering information about the system architecture and system behavior and embedding this information in the safety artifacts such as FTAs. In these conditions, it is difficult to ensure rigorous safety analyses and traceability.
Ideally, this situation could be significantly improved, for instance if engineers produced formal models of the system under development, then extended this model with a dysfunctional model, and then performed safety analyses by deriving FMEAs and FTAs from this latter. However, as currently design models are not formalized enough to be exploited, we think that a first step to bridge the gap towards this ideal situation could consist in a manual but traceable building of the dysfunctional model. The achievement of this objective constitutes the motivation for our methodological proposal.

4 METHODOLOGICAL PROPOSAL

Our proposal consists in building a dysfunctional model of the software from which minimum cuts, FTAs and FMEAs could be automatically generated. Referring to what section 2.2.1 clarified, it relies on the use of a dedicated model [7] and the use of a failure logic modeling technique [6] and supporting languages.
A synopsis of the proposal is presented in Figure 2. It proceeds into 3 steps: ① Dysfunctional Modeling, ② Functional to Dysfunctional Logic Translation and ③ Safety Analysis.

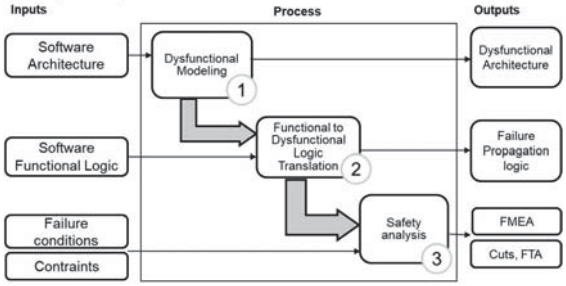


Figure 2. Synopsis of the proposed methodology

Step ① consists in building a dysfunctional hierarchical architecture of the software from the software functional architecture. For each software component, Step ② translates the software functional logic into a failure propagation logic. This step allows writing the output state of each component taking in consideration not only the internal state of the components but also the states of the inputs. Step ② results in a dysfunctional model that is used at Step ③ to perform safety analysis and generate classical safety models (such as minimum cut sets, FTAs and FMEA) from failure conditions and constraints.

4.1 Step 1: Dysfunctional modeling

We propose building a formal dysfunctional model from the software functional architecture in order to capture the fault behavior of the software.
Using various information captured from the software architecture documents (containing informal designs models as well as their functional description), we define and assign abstract states (e.g. active, failed or temporarily failed) and associated transitions[6] (e.g. failure, partial failure, deactivation, cancel) to software components. We do the same for the interface (inputs and outputs) between the components to which we assign abstracts states (e.g. ok, no data, loss, erroneous data). This results in a dysfunctional model featuring the software components and how they are connected by failure dependency links.
Thanks to its graphical representation, this model is easy to understand; as formal, it can be used for simulation, analysis and evidence. To build this model, several formalisms can be used, including state/transition diagrams as well as other dedicated safety modeling languages such as AltaRica or AADL.

To illustrate this proposal, an example is given in Figure 3. It shows three software components A, B and C, to which internal state variables (representing their possible states) are assigned. Each component has 2 states (nominal or failed). The inputs and outputs are also expressed using states (ok, no-data, erroneous). In this example, if the software component B fails (due to its internal state or erroneous input), its output can replicate this failure to the C software component which in turn can relay it to the Failure Condition.

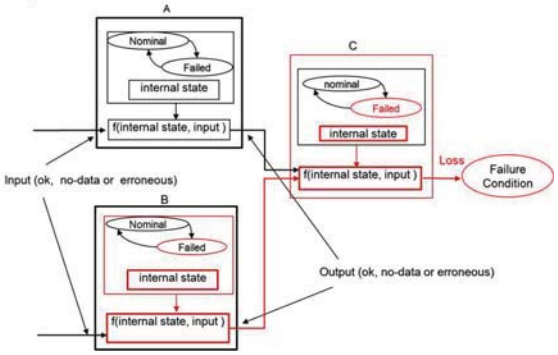


Figure 3. Illustration of a dysfunctional architecture

The completion of Step ① results in a dysfunctional architecture comprising software components (whose behavior is modeled using states) and their interconnections.

4.2 Step 2: Functional to dysfunctional logic translation

To complete the dysfunctional model, the goal of Step ② is to express the dependencies between the component inputs and outputs, that is how failures can propagate through the software architecture. To ensure the consistency between the functional and dysfunctional models, we propose to translate the functional logic into a dysfunctional logic.
Therefore, we proceed by using failure truth tables. We call 'failure truth table' (FTT) one table that systematically maps the normal flows (from the functional logic) into failure flows (dysfunctional logic).
To build the failure truth tables, we first analyze the functional logic of a component. Then using the states (nominal, erroneous, loss), defined in Step ①, we set the inputs (to nominal, erroneous or loss) and deduce the corresponding output (nominal, erroneous, loss). Repeating this process allows building the FTT with all the possible combinations of the inputs and the corresponding outputs in dysfunctional flows.

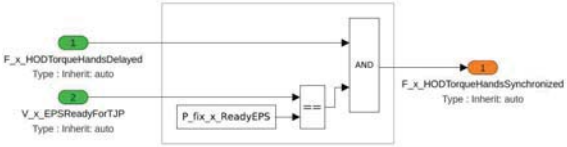


Figure 4. Simple functional logic of a software component

[6] A transition is a passage from one state to another.

To illustrate the construction of an FTT, Figure 4 presents a simple example of functional logic of a software component (in the rectangle). It is a simple function that returns an output based on the value of two inputs labeled 1 and 2. Using our proposal, we set the internal states to the inputs and report to the table the corresponding output states. We reiterate this for all the possible combinations of the input's states.

Table 1. Failure truth table

Input 2 / Input 1	Erroneous	Loss	Nominal
Erroneous	Erroneous	Loss	Erroneous
Loss	Loss	Loss	Loss
Nominal	Erroneous	Loss	Nominal

Output

This results in the FTT shown on Table 1. In the case of this example, if both inputs are 'nominal', then the output is 'nominal'. If either one of the inputs is 'loss' then, the output state is 'loss'. Otherwise, the output state is 'erroneous'.

In order to obtain a computable expression of this logic, we then translate the information of the FTT into a dysfunctional logical expression of outputs:

```
if (input_1 = Nominal AND input_2 = nominal) then
    {Output := Nominal ;}
else if (input_1 = Loss OR input_2 = loss) then
    {Output := loss;}
else
    {Output := Erroneous;}
end if;
```

The advantage of this FTT is that it allows changing the point of view (from functional to dysfunctional) and expressing the failure behavior in a syntactic and formal manner that can be used to write logical expression of the output (for software engineers) as well as in natural language (to communicate). Furthermore, when the design logic evolves, the FTT can be updated accordingly, helping in this way to maintain consistency. They could also be reused in the long run to capture more complex logics.

The completion of Step ② produces a well-expressed failure logic resulting from the FTTs and a complete dysfunctional model that can be used in Step ③ to perform safety analyses.

4.3 Step 3: Safety analysis

This step consists in exploiting the dysfunctional model resulting from Step ② for simulation and generation of safety analyses such as FMEAs, Minimum cut sets and FTAs. To this goal, failure conditions, that represent the violation of safety software associated goals, are added to the architecture.

In conclusion, Step ③ can help in the evaluation of the system safety through simulations and the generation of classical models (Minimum cut sets, FTAs, FMEAs). This saves time and helps the safety engineers in their task.

4.4 Discussion

The proposal offers several interests and significantly improves current practices, mainly thanks to the adoption of a model-based approach. By automating the generation of safety analyses from a dysfunctional model of the software, it allows quickly processing new analyses if ever a modification occurs on the model, at low effort. Assuming that the dysfunctional model is correctly established from the functional model, this methodology prevents from the introduction of bias in manually building FTAs or FMEAs due to potential interpretations of the safety analyst. To perform the functional to dysfunctional model transformation at best, the consistency and traceability between models is ensured thanks to the failure truth tables. In addition, the methodology allows maintaining the safety analyses whenever the design evolves.

However, the proposal still has some limitations. First the manual modeling could be improved if some behavioral attributes of the software component had already been elucidated in the design model. In this case, a partial import could be considered. This highlights the need of improving model-based practices on the design side. A second limitation lies in the manual logic translation through failure truth tables, that could be improved if a form of automation was used, based on a kind of automatic model transformation.

5 CASE STUDY

In an automobile, the Advance Drivers Assistance System (ADAS) and Autonomous Driving (AD) implement software-based functions that assist the driver and improve their driving experience. The chosen case study is a subsystem of the AD software system. As presented in Figure 5, it consists of three main software components: The Hands-Off Detection (HOD), the Longitudinal Control and the Lateral Control. This case study being part of a broader system, we also consider other components of the system (such as the Status Input) that must be included to perform the analysis and to position the software components with respect to their environment.

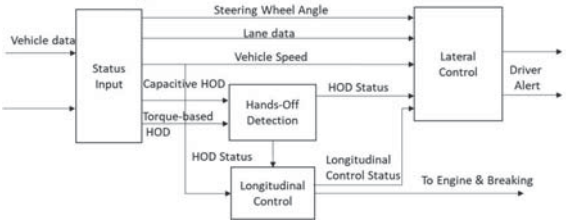


Figure 5 Synopsis of the case study software architecture

At autonomy level 1 (corresponding to assisted driving[7]), the drivers are required to keep their hands on the wheels even though AD features are activated. In this context, the role of the Hands-Off Detection (HOD) is to detect if the

[7] There are 6 levels of autonomy ranging from 0 (no automation) to 5 (full automation)

driver has taken their hands off the steering wheel. To ensure an effective and reliable detection, two redundant strategies are used, a capacitive HOD detection based on a capacitive sensor and a torque based HOD based on a measure of the force the driver applies on the steering wheel. Both strategies provide a consolidated HOD status for lateral and longitudinal control. The Longitudinal Control manages the acceleration, deceleration and braking. The Lateral Control keeps the vehicle in lane. It takes part in critical functions, steering and user alert. Its activation depends on both the HOD and the Longitudinal Control statuses as well as on various environmental and vehicle data (lane, steering wheel angle, vehicle speed) through the Status Input (a software component that provides data to the HOD, Longitudinal and Lateral Control).

5.1 Choosing tools to support the methodology

Let us remember that we chose using a dedicated dysfunctional model and the FLM approach. This allows us to have a more safety-oriented point of view of the system and enforces independence and separation of concern (functional features vs safety considerations).
We chose AltaRica based solution for its simplicity but also for its formal aspects. AltaRica allows expressing a dysfunctional behavior through a well-defined semantic. Moreover the language has been proven useful in many contexts (for instance for systems safety assessments in aeronautics) as outlined in [13]. Among AltaRica based tools we chose SimfiaNeo for its more innovative features and friendly eclipse-based user interface. SimfiaNeo has a built-in step-simulator offers an FMEA generator, and a built-in model checker that is used to directly generate minimum cut sets and FTAs from the dysfunctional architecture.

5.2 Applying the methodology

We then applied the different steps of the methodology: first, in Step ①, we defined and modeled the software components states and basic failures, then in Step ②, we modeled the failure propagation using logical expressions linking outputs to inputs as well as internal states; finally in Step ③, we used the resulting dysfunctional architecture to perform safety analysis.

5.2.1 Step 1: Dysfunctional modeling

We used the information from the AD software functional architecture (documents and informal models) to build our basic dysfunctional model. First, using SimfiaNeo graphical modeling interface, we modeled the software components with model bricks.

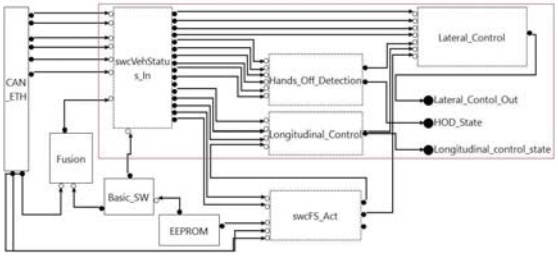


Figure 6. Top level view of the case study model

Then, using AltaRica, we defined domains (cf. section 2.2.2) for components and inputs / outputs, states and associated transitions (expressed as events in AltaRica) for each component. A top-level view of the model is shown in Figure 6. The red rectangle delimits the perimeter of the case study.
We now need to complete this dysfunctional model with a failure propagation logic to be able to perform safety analysis.

5.2.2 Functional to dysfunctional logic translation

A logic translation is used to assist in the building of the failure propagation and ensure a better consistency of the dysfunctional model with the design model. For that, logic retrieved from Simulink models are translated into AltaRica logic using FTTs.
Figure 7 illustrates this transformation. The functional logic is from a subcomponent of the HOD software component. From a functional point of view, this logic returns a status (HODConsolidationHandsOn) based on whether the two signals (HandsOff and HandOff_mirror) are equal. The output (HandsOffState) captures this status.

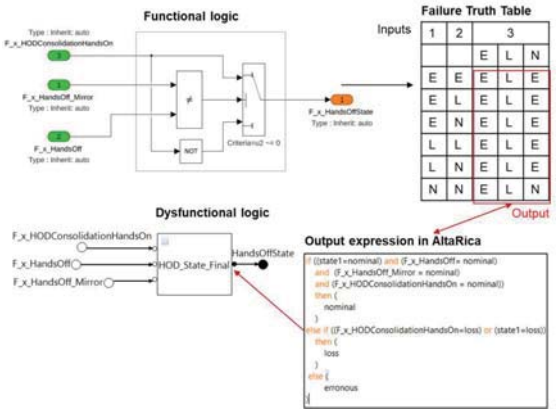


Figure 7. Functional to dysfunctional logic translation using truth failure tables

The goal of the functional to dysfunctional logic translation is to go from this functional point of view to a dysfunctional point of view. For that, we assign the states (predefined in Step ①) to the inputs (on the functional logic), and we write the corresponding output states on the FTT. We reiterate this process for all possible combinations of input states. This creates the corresponding failure table, with all possible output states, as shown in Fig. 7. Using the FTT, we can now write the output expression (of the corresponding dysfunctional brick) in AltaRica.
This step is repeated for all the software components of AD. The tables can be used as templates to model more complex components and systems. This can help save time through reuse. Overall, Step ② completes the dysfunctional model initiated in Step ①. Thanks to this, the dysfunctional model is more consistent with the functional model and can be used for safety analysis in Step ③.

5.2.3 Step 3: Safety Analysis

This step consists in generating classical safety models such as FMEAs, minimum cut sets and FTAs from the dysfunctional model, using the SimfiaNeo model checking capabilities. To this goal, we used the dysfunctional model from Step ② and the failure conditions identified in earlier stages of the safety lifecycle. We proceeded by adding failures conditions using AltaRica observers[8] via direct connections from the software components outputs or through a combination of assertions expressed in AltaRica. Once this is done, we can now perform safety analysis. First, we performed simulations. Then we directly generate FMEAs from the dysfunctional architecture. After that, we compute the minimum cuts sets, from which we were able to immediately generate FTAs.

To perform simulation, we used the SimfiaNeo built-in step simulator. It allows us to interactively assess the dysfunctional behavior of the system. For that, we manually trigger basic failure events (at component level) and observe their effect, through change in colors, on other components and failure conditions (earlier added through AltaRica observers).

SimfiaNeo offers the automatic generation and export of FMEA tables directly from the software dysfunctional model. Given the complexity of the software architecture and the multiple basic failures (at component level), this results in a plethoric number of failure modes (in FMEA tables). For this reason, we found that in our case, the FMEA tables were less pertinent in comparison to minimum cuts and FTAs, that are more compact and synthetic. However, whereas generating FMEA is immediate, generating FTAs requires a (somehow quick and easy) configuration. Preliminary to the creation of FTAs, minimum cut sets are first generated. To generate a minimum cut, we specify the failure condition for the top event, the maximum order (of the computation) and a few other parameters such as the type of generation (stochastic, permutation or combination). We can also add to the configuration some constraints representing any conditions we want to check (e.g. 'No single point of failure'). Once the computation is launched, it returns a table (as shown in Figure 8) listing the basic failure events ('Elements' column), the order (number of basic events contributing to the top event) as well as their probabilities.

Lateral_Control_loss

	Elements	Order	Probability
1	Lateral_Ctl.failure	1	1.0E-6
2	Status_IN.failure & HOD.HODStateFinal.failure	2	1.0E-11
3	Fusion.failure & HOD.HODStateFinal.failure	2	1.0E-11

Figure 8. Loss of lateral control minimum cut set

FTAs basically contain the same information as minimum cut sets but have the advantage of presenting them in a more visual and intuitive way. Figure 9 shows an example of FTA. It is constructed from the minimum cut sets of events leading to the ADAS 'Lateral control loss' feature.

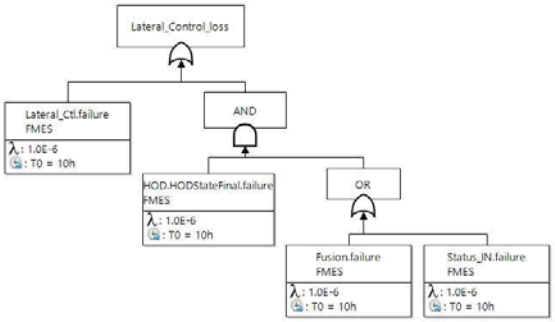


Figure 9. Loss of lateral control status Fault Tree

At the top of the tree stands the top event (Lateral control loss). In the leaves, we see the basic failure events and their probabilities (that are not useful in our case). The FTA graphically shows that the lateral control loss can be caused by the single failure of the lateral control component (Lateral_Ctrl.failure) or a combination of the HOD (HOD.HODStateFinal) with either the Fusion (Fusion.failure) or Statut Input (Status_IN.failure) software component failures. Additionally, the FTA can be useful in capturing inconsistencies in the ASIL decomposition that are not visible through the functional view. For example, the lateral control component is rated ASIL B whereas one of the contributing basic events (Status_IN.failure) in this FTA does not bear any ASIL requirement. So, using FTA can be useful to check if, for a given safety goal, the ASIL of the combination of the triggering event is inconsistent.

This step showed how the classical safety models can be generated from the dysfunctional architecture we built in Step ① and Step ②.

5.3 Case study conclusion

The results from the case study show that using the methodology we propose, it is possible to apply and benefit from a model-based safety analysis approach for software in the automotive industry. It also demonstrates the usefulness and efficiency of using basic and pragmatic tools features such as simulation and failure cause and consequence that are available in tools. Additionally, this approach makes safety analysis more accessible to engineers through a tool-based generation of traditional safety analyses. Overall, the methodology enforces safety by allowing engineers to focus on getting a right model and spending less effort in generating analyses, therefore improving the quality of these automatically generated analyses. The possibility to generate FTA in one click is interesting. Indeed, if the software functional model changes, the dysfunctional model can be updated, and FTAs can be regenerated without additional effort. This means that the dysfunctional model should be maintained. However, given that the dysfunctional model construction and logic translation are done manually, there are some

[8] An AltaRica observer is an indicator that can be associated to failure condition that we want to watch out for.

limitations. First, the manual modeling and logic translation make impractical the application of the methodology to large and complex software systems. This manual modeling approach can certainly be improved to ensure a better consistency of our model with the design model. Secondly, the AltaRica language is system oriented and lacks semantics for certain categories of software failures. It was difficult to express and simulate failures related to timing and values. For example, we were not able to model and observe failures such as the temporary deactivation of lateral control or out-of-range values. In this regard, we consider that the use of AltaRica needs to be reassessed. Nevertheless, the proposed methodology answers our current needs as it is a clear improvement from the manual techniques.

6 PERSPECTIVES AND CONCLUSION

This paper made a methodological proposal for using MBSA for automotive software safety analysis. It consists in building a dysfunctional architecture of the automotive software from the functional high-level software nominal architecture, using compatible semantics and syntaxes, and a translation of a functional to a dysfunctional logic. Then, from this dysfunctional model, the safety engineer can automatically generate minimal cut sets, FTAs and FMEAs for interpretation and as safety proofs if required. We applied this methodology on a real-world industrial case study that involved the use of SimfiaNeo and AltaRica. We concluded on the implementability and usefulness of the methodology. Coupled with the languages and tools we used, it brings added value and improves current manual safety analysis practices. Limitations that we identified will be addressed in future work. This will include improving the dysfunctional modeling for which we will consider a partial automation of the model building and logic translation. We will also explore languages that have better semantics for software failures (AADL EMV2 for example). Finally, we will work on aligning the proposed model-based software safety analysis methodology with model-based software development to ensure better consistency and higher quality of safety analysis.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was sponsored by Renault Software Labs and the ANRT (Association National de la Recherche et de la Technologie). We thank them for their financial support.

REFERENCES

[1] "SEVision2020_20071003_v2_03.pdf." Accessed: Jun. 09, 2020. [Online]. Available: http://www.ccose.org/media/upload/SEVision2020_20071003_v2_03.pdf.

[2] J. A. Estefan, "Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies," p. 70, 2008.

[3] van C. Pham, "Model-Based Software Engineering: Methodologies for Model-Code Synchronization in Reactive System Development," phdthesis, Université Paris-Saclay, 2018.

[4] A. Joshi, S. P. Miller, M. Whalen, and M. P. E. Heimdahl, "A proposal for model-based safety analysis," in *24th Digital Avionics Systems Conference*, Oct. 2005, vol. 2, p. 13 pp. Vol. 2-,

[5] D. Kececioglu, *Reliability Engineering Handbook*, 1 edition. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1991.

[6] P. Fenelon and J. A. McDermid, "An integrated tool set for software safety analysis," *J. Syst. Softw.*, vol. 21, no. 3, pp. 279–290, Jun. 1993.

[7] O. Lisagor, T. Kelly, and R. Niu, "Model-based safety assessment: Review of the discipline and its challenges," in *The Proceedings of 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, Guiyang, China, Jun. 2011, pp. 625–632.

[8] O. Lisagor, "Failure logic modelling: a pragmatic approach," phd, University of York, 2010.

[9] Y. Papadopoulos and J. A. McDermid, "Hierarchically Performed Hazard Origin and Propagation Studies," in *Computer Safety, Reliability and Security*, Sep. 1999, pp. 139–152.

[10] G. Point and A. Rauzy, "AltaRica: Constraint automata as a description language." Accessed: Nov. 28, 2019. [Online]. Available: http://www.altarica-association.org/ressources/ARBib/PointRauzy1999-AltaRicaConstraintLanguage.pdf.

[11] Y. Papadopoulos and M. Maruhn, "Model-based synthesis of fault trees from Matlab-Simulink models," in *2001 International Conference on Dependable Systems and Networks*, Jul. 2001, pp. 77–82.

[12] J. Delange and P. Feiler, "Architecture Fault Modeling with the AADL Error-Model Annex," in *2014 40th EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications*, Aug. 2014, pp. 361–368.

[13] P. Bieber, C. Bougnol, C. Castel, J.-P. H. Christophe Kehren, S. Metge, and C. Seguin, "Safety Assessment with Altarica," in *Building the Information Society*, Boston, MA, 2004, pp. 505–510.

[14] M. Gudemann and F. Ortmeier, "A Framework for Qualitative and Quantitative Formal Model-Based Safety Analysis," in *2010 IEEE 12th International Symposium on High Assurance Systems Engineering*, Nov. 2010, pp. 132–141.

[15] M. Bouissou, H. Bouhadana, M. Bannelier, and N. Villatte, "Knowledge Modelling and Reliability Processing: Presentation of the Figaro Language and Associated Tools," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 24, no. 13, pp. 69–75, Oct. 1991.

[16] P. H. Feiler, B. Lewis, S. Vestal, and E. Colbert, "An Overview of the SAE Architecture Analysis & Design Language (AADL) Standard: A Basis for Model-Based Architecture-Driven Embedded Systems Engineering," in *Architecture Description Languages*, Boston, MA, 2005, pp. 3–15.

[17] H. Blom *et al.*, "EAST-ADL: An Architecture Description Language for Automotive Software-intensive Systems in the Light of Recent use and Research," *Int. J. Syst. Dyn. Appl.*, vol. 5, no. 3, pp. 1–20, Jul. 2016.

[19]"AltaRica Association." http://www.altarica-association.org/ (accessed May 25, 2020).
[20] M. Bozzano *et al.*, "Symbolic Model Checking and Safety Assessment of Altarica models," vol. 35, p. 16, 2010.
[21] M. Boiteau, Y. Dutuit, and A. Rauzy, "The AltaRica Data-Flow Language in Use: Modeling of Production Availability of a MultiStates System," p. 22.
[23]M. Machin, L. Sagaspe, and X. de Bossoreille, "SimfiaNeo, Complex Systems, yet Simple Safety," p. 4.
[24] "OpenAltaRica." https://www.openaltarica.fr/ (accessed May 27, 2020).
[25] "AltaRica Project | MEthods and Tools for AltaRica Language." https://altarica.labri.fr/wp/
[26] "Architecture Analysis and Design Language." https://www.sei.cmu.edu/research-capabilities/allwork/display.cfm?customel_datapageid_4050=191439.
[27] "Welcome to OSATE — OSATE 2.7.1 documentation." https://osate.org/# (accessed May 25, 2020).
[28] "EAST-ADL Association." https://www.east-adl.info/Specification.html (accessed Apr. 16, 2020).
[29] B. Bittner *et al.*, "The xSAP Safety Analysis Platform," in *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*, 2016, vol. 9636, pp. 533–539.
[30] M. Sango, F. Vallée, A.-C. Vié, J.-L. Voirin, X. Leroux, and V. Normand, "MBSE and MBSA with Capella and Safety Architect Tools," in *Complex Systems Design & Management*, Cham, 2017, pp. 239–239.
[31] N. M. Inc, "MagicDraw." https://www.nomagic.com/products/magicdraw (accessed May 27, 2020).
[32] "Automotive_SPICE_PAM_30.pdf." Available: http://www.automotivespice.com/fileadmin/software-download/Automotive_SPICE_PAM_30.pdf.
[33] 14:00-17:00, "ISO 26262-1:2018," *ISO*. https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/iso-org/contents/data/standard/06/83/68383.html (accessed Jun. 10, 2020).
[34] A. Joshi, M. Whalen, and M. P. E. Heimdahl, "ModelBased Safety Analysis: Final Report," 2005.

GESTION DE L'ENERGIE ET DE LA DEMANDE DE POINTE EN PUISSANCE DANS L'INDUSTRIE : REVUE DE LITTERATURE

Imen CHAABOUNI, Nadia LEHOUX, Louis GOSSELIN

Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Québec, Canada
imen.chaabouni.1@ulaval.ca,
Nadia.Lehoux@gmc.ulaval.ca,
Louis.Gosselin@gmc.ulaval.ca

Hugues FORTIN

Laboratoire des technologies de l'énergie, Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)
Shawinigan, Québec, Canada
Fortin.Hugues@ireq.ca

RESUME : *Le secteur industriel, dont la production forestière fait partie, est un important utilisateur d'énergie avec une consommation représentant environ 41,9% de l'énergie totale produite dans le monde. Une proportion importante est un produit des combustibles fossiles, entraînant ainsi des émissions en dioxyde de carbone atteignant 33 milliards de tonnes (International Energy Agency, 2019). Dans un contexte de mondialisation, les manufacturiers cherchent aussi à réduire les coûts. Un des moyens à valoriser est une meilleure gestion de l'énergie, tout en maintenant le meilleur rendement possible de leur système de production. L'efficacité énergétique et la flexibilité des procédés industriels ont un rôle important dans cette démarche. Cet article présente diverses stratégies opérationnelles adoptées dans l'industrie pour optimiser la consommation énergétique de manière plus responsable. Il regroupe par ailleurs des approches visant à maximiser la flexibilité des procédés industriels afin de participer aux différents programmes de gestion de la demande de pointe en puissance des utilités électriques, plus particulièrement dans le secteur du sciage du bois d'œuvre.*

MOTS-CLES : *Gestion opérationnelle, gestion de la demande de pointe en puissance, économie d'énergie, production de bois d'œuvre, industrie forestière.*

1 INTRODUCTION

Selon (IEA, 2019), entre 2015 et 2018, le rapport entre la consommation d'énergie et le produit intérieur brut des pays s'est amélioré, mais son taux annuel d'amélioration a toutefois ralenti, passant de 2,9% à 1,2%, le niveau le plus bas depuis 2010. Les facteurs à l'origine de ce récent ralentissement comprennent notamment des changements du côté de l'offre, tels qu'une augmentation de l'utilisation d'énergie issue de combustibles primaires à forte intensité énergétique et des changements du côté de la demande, par l'augmentation de la production venant d'industries à forte intensité énergétique dans certaines des plus grandes économies mondiales (en particulier la Chine et les États-Unis). Notons également des conditions météorologiques exceptionnelles en 2018 qui ont stimulé la demande en gaz et en électricité utilisés pour le refroidissement et le chauffage des espaces (International Energy Agency, 2019).

Dans la province de Québec, au Canada, le constat s'avère le même avec une activité industrielle à l'origine de 35 % de la consommation énergétique (Whitmore *et al.* 2020). De plus, près de 60% de l'énergie consommée provient de sources d'énergie renouvelable (48% électricité et 12% biomasse). L'électricité est produite en grande partie par Hydro-Québec, société d'État québécoise et principal producteur et distributeur d'électricité de la province. Celle-ci fournit à sa clientèle une source d'énergie composée à 99 % d'énergie renouvelable grâce, entre autres, à une capacité de production hydroélectrique de 36,9 GW (Hydro Québec, 2016). Le reste de l'énergie fourni provient pour sa part de source fossile (23% gaz naturel et 17% des produits pétroliers ou du charbon). Les industries manufacturières des pâtes et papiers représentent à elles seules 21 % de la consommation d'énergie totale du secteur industriel. (Whitmore *et al.* 2020) Au niveau des émissions de gaz à effet de serre (GES), environ 24 % sont attribuable aux secteurs industriels ((MELCC), 2018). Lorsqu'on tient compte des GES non énergétiques, les émissions du secteur comptent pour environ 45 % du bilan québécois.

Les gouvernements ont un rôle essentiel à jouer pour favoriser le développement des politiques encourageant une utilisation responsable de l'énergie et un recours à des moyens à haut rendement énergétique (*International Energy Agency*, 2019). Un bel exemple concerne les programmes de gestion de la demande en puissance (GDP) ou « *Demand Side Ma-*

nagement » (DSM). Selon le *U.S. Energy Information Administration*, les programmes de GDP consistent en la planification, la mise en œuvre et les activités de surveillance des services publics d'électricité, conçues pour encourager les consommateurs à modifier leur profil de charge électrique temporairement pour répondre aux différents besoins des utilités électriques. En grande période de demande, les adhérents aux programmes de GDP peuvent répondre aux besoins de capacité en délestant temporairement leurs charges et/ou en déplacement temporel de certaines utilisations (Paulus *et al.*, 2010).

Hydro-Québec a suivi le même mouvement, en instaurant lui aussi un programme de GDP offert à la clientèle de moyenne puissance. Le programme, proposé aux clients des marchés commerciaux et institutionnels (CI) ainsi que les petites et moyennes industries (PMI), vise à réduire la demande de puissance pendant aux maximum 100 heures de pointe les plus critiques en période hivernale (décembre à mars). En contrepartie, Hydro-Québec verse aux participants un appui financier de 70$/kW-an proportionnel à la réduction de puissance calculée pendant ces heures (Hydro Québec, 2019).

Dans cet article, nous nous intéressons aux différentes stratégies qui ont été déployées par le secteur industriel pour utiliser plus judicieusement l'énergie et minimiser l'appel de puissance en période de pointe afin de contribuer aux différents programmes de GDP. Nous explorons également un peu plus en profondeur les approches déployées dans le secteur de la production de bois d'œuvre, puisque l'industrie forestière revêt une importance particulière pour le Québec en assurant la vitalité de ses régions et de ses communautés rurales. Il a en effet été recensé qu'au minimum, plus d'un emploi sur quinze (6,8%) en milieu rural est directement lié à l'exploitation de la forêt. Dans 80 municipalités du Québec, les activités de l'industrie forestière représentent plus de 15% de l'emploi local. Ainsi, la contribution des économies de la forêt représente 2,8 % du PIB québécois (Fédération Québécoise des municipalités, 2017). Cette industrie est aussi une source importante de biomasse dont Hydro-Québec a évalué le potentiel brut de valorisation énergétique, en incluant le secteur agroalimentaire et urbain, à 333 PJ par an (Whitmore *et al.*, 2020).

Pour mettre en lumière de telles stratégies, une revue de la littérature a été réalisée, suivant la technique du cercle herméneutique. Cette revue a cherché à répondre à cinq questions de recherche, à savoir : (Q1) quelle est la première étape à mettre de l'avant pour se lancer dans une stratégie opérationnelle visant à réduire la consommation d'énergie dans l'industrie; (Q2) quelles sont les stratégies opérationnelles pouvant diminuer la consommation d'énergie et l'appel de puissance dans une usine ou une production en série; (Q3) existe-t-il une modélisation mathématique planifiant la production au sein d'une usine intégrant la consommation énergétique ou l'appel en puissance; (Q4) quelles sont les motivations encourageant les industriels à inclure la gestion énergétique comme paramètre dans leur planification opérationnelle et; (Q5) comment peut-on contrôler la consommation d'énergie et l'appel de puissance au sein d'une scierie durant une journée de travail. À l'issue de cette recherche, les plus récents articles trouvés ont pu être utilisés pour lancer le cercle herméneutique. Les recherches ont été restreintes entre 2003 et 2020 pour bien cerner les techniques et solutions les plus récentes du domaine. Une fois la recherche complétée, ce sont plus de 70 articles qui ont été recueillis et analysés. Tous ne sont pas cités ici, mais chacun d'eux a permis d'identifier certaines références ou de mieux comprendre les tenants et aboutissants de la thématique investiguée.

Ce papier contribue donc à mieux faire connaître les différentes méthodes auxquelles peuvent avoir recours les entreprises manufacturières afin de limiter leur consommation énergétique au cours de la réalisation de leur activité de production. Cette étude expose aussi l'état de l'art des approches de gestion opérationnelle intégrant la facette énergétique et la demande en puissance. L'article se divise en trois sections. Tout d'abord, la méthodologie suivie pour réaliser la revue de la littérature est explicitée. Par la suite, chacune des questions de recherche est examinée et les réponses à de telles questions sont présentées. Une conclusion vient clore le travail.

2 METHODOLOGIE POUR L'ELABORATION DE LA REVUE DE LITTERATURE

Entreprendre une revue de la littérature est une partie importante de tout projet de recherche. Le chercheur détermine un plan et évalue le territoire intellectuel pertinent afin de spécifier des questions de recherche qui permettront de développer davantage la connaissance (Tranfield *et al.*, 2003). La revue de littérature suivie dans cette recherche est associée à la méthode du cercle herméneutique. Il s'agit d'un processus en 7 étapes tel que décrit par (Sebastian K. *et al.*, 2010). Plus particulièrement, une étape initiale consiste à déterminer le point d'entrée au cercle herméneutique. Dans notre cas, le mémoire de maîtrise de (Dumont, 2019) a servi comme point de départ de cette recherche puisque portant sur un sujet très similaire au nôtre. La première étape de la méthode implique d'identifier des mots clés qui sont dans notre cas : *Energy Eff*, Demand- Response, energy demand reduction, energy saving, demand-side management Operational Management Operat* planning, Operat* production/ procurement* et *Peak power demand* avec leurs combinaisons possibles, ce qui nous a permis d'identifier des articles de la littérature permettant d'avoir une vue globale sur les découvertes récentes comme (May *et al.*, 2016), (Dasheng *et al.*, 2015) et (Gahm *et al.*, 2015). Ces articles seront, lors d'une deuxième étape, évalués d'après leur pertinence afin de les trier.

La troisième étape est basée sur la formulation des questions de recherche puisque ces dernières guideront par la suite le choix des articles à conserver et à explorer en profondeur. Durant la quatrième étape, la recherche d'articles nécessaires à l'analyse se poursuit. Pour cette étude, la recherche a été faite essentiellement via les bases de données *Compendex* et *Inspec* à travers *Engineering Village*, puis via les bases de données *Web of Science* et *Wiley*. La cinquième étape, qui est la plus importante dans l'évolution du cercle herméneutique, est celle de lire les articles identifiés. À travers cette étape, les concepts principaux sont maitrisés ainsi que le vocabulaire lui étant associé. Cette lecture permet de catégoriser les documents recueillis et d'associer chaque ensemble d'articles aux questions de recherche établies. La sixième étape repose sur une étude de la littérature de manière plus approfondie en ciblant des auteurs très actifs dans ce domaine et établir une liste des « revues de base ». Finalement, la dernière étape consiste à raffiner la recherche et à quitter le cercle herméneutique en fixant des critères pragmatiques. Lorsque la recherche d'articles ne permet plus de dégager des publications supplémentaires contribuant à la compréhension d'un phénomène, cela indique que les principales publications ont été identifiées et lues et que le point de saturation a été atteint (Boell *et al.*, 2010).

3 REVUE DE LITTERATURE : ANALYSE THEMATIQUE

Cet article cherche à dresser une revue de l'état de l'art des méthodes utilisées dans l'industrie en général et dans les scieries en particulier, afin de mieux utiliser l'énergie dans les activités de transformation. Les prochaines sous-sections reprennent chaque question de recherche définie et en explicitent les réponses suite à l'analyse de la littérature.

3.1 Quelle est la première étape à mettre de l'avant pour se lancer dans une stratégie opérationnelle visant à réduire la consommation d'énergie dans les usines ?

Le terme « gestion de l'énergie » a un certain nombre de significations dans la littérature. L'un de ces sens peut être résumé comme suit "processus de surveillance, de contrôle et de conservation de l'énergie dans un bâtiment, une organisation ou un système de distribution" (Mostafa Haytham *et al.*, 2014). Une gestion de l'énergie au sein d'une industrie exige typiquement le passage par plusieurs étapes afin d'assurer une continuité dans l'implantation d'une efficacité énergétique durable.

Une première phase consiste à capturer la consommation de l'usine, dans le but de mieux comprendre le comportement énergétique des équipements et des processus, facilitant ainsi la surveillance et l'investigation. Cette phase peut être accomplie en focalisant soit sur la collecte des données de consommation d'énergie des équipements et des machines, soit sur le processus global de production.

Si on jette tout d'abord un œil du côté des équipements, le manque de connaissances détaillées de la consommation a été identifié comme un obstacle majeur à la gestion de l'énergie dans les petites et moyennes industries (PMI) (Richard *et al.*, 2017). En effet, le manque de connaissance des profils de consommation des équipements est considéré comme l'un des principaux obstacles à la participation à des programmes de gestion de l'énergie et de la demande en puissance en général. (Dumont, 2017) propose donc, en se référant à (Thiede *et al.*, 2012), un cadre pour justement définir les profils de consommation énergétique. Il s'agit tout d'abord de faire une liste complète des machines et des équipements utilisés dans l'unité d'affaires à l'étude, puis de déterminer la puissance nominale théorique qui leur est associée. En ayant accès au temps d'utilisation de chaque machine pour la production de chacun des produits, il devient alors possible de déterminer la consommation énergétique (W, en kWh) à partir de la formule $W = FC * P * t$, où FC est un facteur de charge, P est la puissance nominale de la machine (kW) et t est le temps de fonctionnement de la machine (h). On peut ainsi classer chaque équipement de l'entreprise selon son niveau de consommation énergétique et son temps d'opération (Dumont, 2017). Un des défis est alors souvent de connaître comment le facteur de charge ou le ratio entre la puissance réelle et la puissance nominale d'une machine est influencé par divers facteurs tels la gestion des opérations, l'usure des équipements, le système de contrôle, la température extérieure, etc. (Drake *et al.*, 2005) se concentrent pour leur part sur des mesures réelles. Ils introduisent un cadre de collecte de données concernant la consommation d'énergie dans le secteur manufacturier reposant sur 6 étapes : initialiser la ligne de production, configurer l'appareil de mesure, capturer la puissance totale du système, analyser la puissance totale du système, identifier les sous-systèmes et capturer et analyser le comportement des sous-systèmes. En utilisant ce cadre, ils précisent qu'il devient possible de prédire le comportement du système d'un point de vue énergie.

Dans le même ordre d'idées, (Richard *et al.*, 2017) proposent de faire appel au regroupement des profils de consommation énergétique journaliers des équipements d'une usine selon leur degré de similarité. Il s'agit de faire appel à un algorithme d'agrégation qui regroupe les profils quotidiens de charges similaires de façon à mettre en relief des relations entre l'énergie demandée, la planification de la production et les charges des équipements. Il devient également possible de mettre en relief l'impact des conditions météorologiques saisonnières sur la demande en énergie lorsque la consommation de l'usine est sensible à de telles conditions (Richard *et al.*, 2017). (Ruzzelli *et al.*, 2010) ont proposé un système complet qui peut être facilement installé dans des bâtiments existants pour permettre aux utilisateurs de définir, analy-

ser, comparer et reconnaître des charges en temps réel. Le système intègre une base de données stockant des signatures d'appareils déterminés, appuyé par une interface graphique simple pour afficher la consommation énergétique et le profil des appareils concernés. Le système a été testé dans un environnement réel et a démontré une grande précision.

Si on regarde maintenant du côté du système global de production, diverses données énergétiques peuvent être acquises en surveillant les processus en plus des équipements (Swat *et al.*, 2013). En effet, la stratégie de mesure proposée par (Swat *et al.*,2013) implique différentes étapes. Il s'agit tout d'abord de définir la façon d'effectuer la mesure, à partir de quel appareil ou équipement de mesure et l'intervalle de temps mesuré. La seconde étape implique de définir quels processus mesurer, les points de mesure et les moments pour la prise de mesure. L'étape suivante repose sur la capture des données en tant que tel, en précisant les interfaces et mécanismes à utiliser pour la communication des données. Il devient alors nécessaire de déterminer comment les données recueillies seront traitées et exploitées à l'aide de méthodes statistiques (Swat *et al*., 2013).

Une telle investigation doit toutefois tenir compte des particularités de certains processus. Certaines opérations peuvent par exemple être exécutées à chaque pièce produite, alors que d'autres ne peuvent se produire que lors du démarrage de la machine. Certains processus du système peuvent durer tout le long du fonctionnement de la machine, alors que d'autres ne durent qu'une partie du temps de travail (Kordonowy *et al.*, 2002). On distingue également les états des machines, qui peuvent être classifiés de plus ou moins avantageux d'un point de vue énergétique. Une consommation d'énergie continue ne sert pas nécessairement à la production d'une pièce, entraînant de "l'énergie gaspillée" comme le décrivent (Kordonowy *et al.*, 2002). En effet, lorsqu' une machine ou un équipement démarre, il peut entraîner le démarrage de toute une série d'autres équipements qui fonctionneront pendant toute la durée en marche de la machine ou de l'équipement en question (Kordonowy *et al.*, 2002).

Suite à la collecte et à l'analyse de ces mesures, il devient alors intéressant de déployer des stratégies opérationnelles visant à résoudre l'enjeu de la consommation énergétique. C'est ce qu'aborde la prochaine question de recherche.

3.2 Quelles sont les stratégies opérationnelles pouvant diminuer la consommation d'énergie et l'appel de puissance dans une usine ou une production en série ?

Pour répondre à cette question, des articles scientifiques portant sur la planification opérationnelle éco énergétique dans les usines ont été explorés. Suite à cette lecture, deux types de stratégies ont pu être dégagés, allant dans la même lignée que la première étape de tout programme de gestion de l'énergie, soit des stratégies qui se focalisent sur les équipements et d'autres qui se concentrent sur l'ensemble des processus.

Un premier groupe de stratégies permettant de réduire la consommation énergétique dans le milieu industriel concerne la réingénierie des machines. (Yildirim *et al.*, 2014) portent leur attention sur la maintenance. En effet, la dégradation d'une machine augmente la puissance requise pour faire fonctionner ses composants auxiliaires. Les auteurs proposent donc un modèle mathématique non linéaire à nombres entiers mixtes pour étudier un problème multi-périodes et multi-produits de planification de la maintenance préventive avec réparations minimales et coûts énergétiques périodiques. Comme le mentionnent (McKane *et al.,* 2008), la fiabilité des systèmes se veut aussi un facteur déterminant lors de la participation à des programmes de gestion de la demande en puissance. En effet, l'éventualité d'intégrer complètement la gestion de la charge, incluant la réponse à la demande et l'efficacité énergétique au sein de l'usine, semble possible grâce à un plus grand accès aux données. De tels systèmes peuvent permettre à l'usine de gérer l'électricité et potentiellement le gaz naturel, au prix et à la demande réels, tout en libérant automatiquement de l'électricité sur le réseau afin de préserver la fiabilité de la fourniture d'électricité à l'échelle de l'État (McKane et *al.*, 2008).

Au niveau des processus, les études sur la consommation d'énergie des procédés de fabrication ont fourni des informations importantes pour améliorer l'efficacité énergétique et ancrer les bases d'une réduction globale de la consommation d'énergie des processus de fabrication (Li W *et al.*, 2012). Sous cette grande famille de stratégies, on peut notamment retrouver le paramétrage des machines. Un bon exemple concerne le procédé de découpe lors de l'usinage. Des recherches ((Murphy *et al.*, 2003) (Dietmair *et al.*, 2009) et (Mativenga *et al.*, 2011)) ont été réalisées à cet effet, confirmant que la consommation d'énergie et l'efficacité énergétique dépendent du choix de la configuration du procédé (Zhao *et al.*, 2017). (Newmann *et al.*, 2012) ont pour leur part introduit la notion de processus interchangeables. En effet, deux processus sont considérés comme interchangeables en ce qui concerne une pièce spécifique si leur effet sur cette pièce est le même. Les résultats à la suite de l'étude du cas d'usinage variaient, selon la charge utilisée, entre 6% et 40% de gain d'énergie consommée.

(Li W *et al.*, 2012) proposent une approche intégrée pour évaluer l'éco-efficacité d'un processus unitaire, qui couvre trois aspects : les paramètres du processus, la consommation d'énergie et de ressources et les performances de qualité. Ils définissent le processus unitaire comme un service qui génère de la valeur pour les produits alors qu'il consomme de

l'énergie et d'autres ressources. L'évaluation d'un cas de broyage testé montre la nature dynamique du processus de fabrication, dont l'éco-efficacité peut être améliorée en prenant en compte ces trois aspects (Li *et al.*, 2012).

Un autre sous-ensemble de stratégies concerne l'état de l'appareil. On parle ici d'un appareil allumé, en arrêt, en attente ou inactif. (Swaminathan *et al.*, 2003) ont proposé un système de contrôle pour réduire la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie de batteries. En changeant simplement l'état des appareils, ils ont montré qu'il peut y avoir une réduction importante quant à la consommation d'énergie engendrée. (Mouzon *et al.*, 2007) ont réalisé une expérience au sein d'une usine de petites pièces d'aviation située à Wichita, Kansas. Il s'agissait d'arrêter les machines pendant le temps de pause, ce qui a permis de réduire de 13% la consommation énergétique. Dans le même sens, (Swat *et al.*, 2013) proposent un modèle mathématique permettant de choisir entre laisser la machine fonctionner lors de l'état inactif ou de l'arrêter pour un certain temps, dans le but de générer des économies d'énergie.

Un dernier groupe de stratégies se basent sur la planification des opérations/ tâches au sein de l'usine. Dans cette optique, (Dumont, 2017) suggèrent 3 différentes stratégies à déployer au sein d'une usine de fabrication de bois d'œuvre. Ces approches reposent sur l'ordonnancement des opérations en déplaçant la production de certains produits consommant plus d'énergie à des périodes moins critiques, le recours à des pauses par alternance durant la journée pour éviter une surconsommation énergétique lors de la reprise des opérations après un arrêt complet de la ligne de production et l'ajustement des horaires de travail pour que la production soit minimale ou arrêtée le matin et le soir. Ces stratégies peuvent avoir un effet sur le temps de production et les produits générés.

Stratégies visant les processus
• La maintenance préventive (Yildirim, 2014) • L'analyse de la fiabilité (McKane et *al.*, 2008)
Stratégies visant les équipements
Paramétrage des machines • Configuration du procédé (Zhao et *al.*, 2017) • Processus interchangeables (Newmann *et al.*, 2012) • Processus unitaire (Li.W *et al.*, 2012) *État de l'appareil* • Système de contrôle (Swaminathan V *et al.*, 2003) • Arrêt lors du temps de pause (Mouzon *et al.*, 2007) *Planification des opérations et des tâches dans l'usine* • Ordonnancement des opérations (Dumont, 2017) • Décalage des temps de pause (Dumont, 2017) • Ajustement de l'horaire de travail (Dumont, 2017)

Tableau 1: Liste des stratégies de gestion de l'énergie issues de la littérature à déployer dans une usine

3.3 Existe-t-il une modélisation mathématique planifiant la production au sein d'une usine intégrant la consommation énergétique ou l'appel en puissance ?

Plusieurs voies ont été suivies pour la planification de la production en considérant la réduction de la consommation énergétique totale. L'état des appareils au sein de l'usine est l'une des voies valorisées puisqu'une quantité importante d'énergie est gaspillée quand les machines ne sont pas productives. D'ailleurs, certains modèles de planification prennent en compte les différentes quantités d'énergie associées à certains états des appareils, tels que le démarrage, l'état ralenti et l'arrêt, comme c'est le cas du travail de Li *et al.* (2016) et de Liang *et al.* (2015). La relation entre une machine et sa consommation d'énergie peut être aussi considérée comme un point de départ pour la planification. Liu *et al.* (2014) ont considéré un problème de planification de machines parallèles indépendantes, dans le but de minimiser le retard total et la consommation d'énergie.

D'autres chercheurs ont fait intervenir le paramètre coût dans leurs modèles. (Dumont *et al.*, 2017) proposent par exemple un modèle de planification tactique spécialement développé pour l'industrie du bois d'œuvre, intégrant le coût de l'énergie électrique dans le processus de décision afin de minimiser la consommation d'électricité. (Zeng *et al.*, 2018) ont pour leur part développé un algorithme de planification à deux objectifs pour minimiser à la fois les coûts énergétiques et le nombre de machines utilisées. Les coûts de l'énergie sont basés sur la tarification TOU, une tarification structurée selon les heures de demande de pointe en puissance. Ce modèle ne prend pas explicitement en compte les puissances maximales facturées, mais la réduction du nombre total de machines pourrait avoir des impacts importants sur les pointes de demande.

La demande de pointe a aussi été abordée dans certaines études. L'une des avenues poursuivies pour la modélisation de la demande de pointe est l'inclusion du paramètre coût lui étant associé. (Cui, 2019) propose une approche avec horizon roulant afin de réduire le coût de la consommation d'énergie et le coût de la demande de pointe lors de la planification d'un système de production. Le modèle cherche à optimiser l'allocation de l'énergie des systèmes de micro-réseaux, incluant à la fois un système d'énergie renouvelable ainsi qu'un système de stockage énergétique, abaissant ainsi la charge de pointe et la consommation totale d'énergie. Dans ce travail, les auteurs ont pris en considération la probabilité des pannes des machines durant chaque période, la notion de stock tampon ainsi que les états des machines en accordant au flux énergétique provenant du système de micro-réseaux la priorité puisque c'est de l'énergie propre et renouvelable. L'idée de reconfiguration du système de production en soi est par contre absente.

(Abikarram *et al.*, 2018), de leur côté, ont indiqué que la prise en compte des puissances maximales facturées dans la planification de la production peut aider à réduire la charge de pointe et les coûts énergétiques totaux, sans augmenter la consommation totale d'énergie. Les chercheurs visent à minimiser le coût total de l'électricité, qui comprend à la fois les coûts liés à la demande de pointe et à l'énergie consommée. L'étude a mis notamment l'accent sur les prix facturés pour la demande de pointe, le nombre de machines, le taux d'utilisation des machines et le nombre d'opérations par machine. Cette étude montre que la prise en compte des puissances maximales facturées dans la planification de la production peut aider à réduire la charge de pointe et les coûts énergétiques totaux. Néanmoins, elle s'est basée sur une seule journée comme horizon de planification, ce qui ne correspond typiquement pas à la période de facturation, la réduction des frais d'électricité n'est ainsi pas validée pour une plus longue durée.

(Dababneh *et al.*, 2016) montrent qu'une réduction de la demande de puissance de pointe d'un système de fabrication peut être obtenue pour une journée d'été et d'hiver respectivement en contrôlant séparément le système de chauffage/climatisation, sans influencer la production. Le modèle proposé est formulé comme un problème de programmation non-linéaire en nombres entiers mixtes. Le système de modélisation algébrique générale (GAMS) est utilisé pour résoudre le modèle et identifier le plan de production de même que les points de consigne de température qui peuvent minimiser la demande d'énergie pendant les périodes de pointe. Les auteurs ont toutefois écarté le paramètre température comme un facteur ayant une influence sur la performance de l'usine.

L'ordonnancement des opérations a aussi été considéré afin d'abaisser la demande de pointe en puissance. (Ashok et *al.*, 2006) présentent un modèle de charge qui incorpore les caractéristiques des charges par lots communes à toute industrie de procédés. Le modèle est couplé à une optimisation utilisant une programmation en nombres entiers minimisant le coût total d'électricité et répondant aux contraintes de production, de flux de processus et de stockage pour différentes structures tarifaires. La méthodologie proposée peut être utilisée pour déterminer la réponse optimale pour toute industrie soumise à des tarifs énergétiques variables dans le temps. L'étude de cas d'une aciérie montre que des réductions significatives de la demande en période de pointe (environ 50%) et du coût d'électricité (environ 5,7%) sont possibles avec des calendriers de charge optimaux. Le calcul de l'énergie consommée est fait indépendamment de l'état de la machine. L'énergie due au chauffage/climatisation des espaces de travail /usine n'est pas non plus prise en considération dans la fonction objectif. Les travaux de (Mouzon *et al.*, 2007, 2008) et (Yildirim *et al.*,2011) proposent pour leur part, suite à une série de modèles initiaux, un modèle final minimisant la consommation totale d'énergie, le temps total d'achèvement et l'équilibrage de charges sur différentes machines parallèles. On peut conclure qu'il existe des modélisations ayant comme objectif de minimiser la consommation énergétique ainsi que la demande en puissance. Deux catégories peuvent être distinguées des modèles existants : ceux qui intègrent la facette énergétique à travers son coût, et d'autres abordant plutôt le problème opérationnel sans avoir recours au paramètre coût : état opérationnel des appareils, caractéristiques des machines et ordonnancement des opérations. Le tableau 2 résume ces constats.

Réduction de la consommation énergétique totale
L'état des appareils
• (Li *et al.*, 2016) et de (Liang *et al.*, 2015)
Relation entre énergie et la machine
• Minimisation du retard (Liu *et al.*, (2014))
Ordonnancement des opérations
• Temps d'achèvement (Mouzon *et al.*, 2007)
• Minimiser les retards (Mouzon *et al.*, 2008)
• Équilibrage de charges (Yildirim *et al.*, 2011)
Inclusion du paramètre coût
• Processus de décision (Dumont *et al.*, 2017)
• Nombre de machines (Zeng *et al.,* 2018)

Réduction de la demande de pointe en puissance
Ordonnancement des opérations
• Flux de procédés et de stockage (Ashok et *al.*, 2006)
Caractéristiques des machines
• Chauffage (Dababneh et *al.*, 2016)
Inclusion du paramètre coût
• Micros-réseaux et énergies renouvelables (CuiW et *al.,* 2019)
• Puissance maximale facturée (Abikarram et *al.*, 2018)

Tableau 2: Liste des modèles retenus pour la revue

3.4 Quelles sont les motivations encourageant les industriels à inclure la gestion énergétique comme paramètre dans leur planification opérationnelle ?

Selon la littérature, les motivations de l'efficience énergétique au sein d'une usine se répartissent en 3 catégories, soit les obligations réglementaires, les avantages économiques et les avantages organisationnels.

(Gutowski *et al.*, 2005) ont classé leurs observations d'après un examen des pratiques de fabrication respectueuses de l'environnement dans les grandes entreprises de l'automobile et de l'électronique au Japon, en Europe (nordique) et aux États-Unis, suivant les trois catégories mentionnées précédemment. Ils ont notamment souligné les avantages réglementaires et économiques touchant la préservation des ressources, la réduction des coûts et la satisfaction des exigences clients et de certains avantages organisationnels comme une mise en valeur de l'image de l'entreprise ou un plus grand sentiment d'appartenance de la part des employés. (Nadel et *al.*, 2017), en réponse à la question 'Pourquoi les entreprises investissent-elles dans l'efficacité énergétique ?', expliquent : Les entreprises qui décident d'investir dans l'efficacité énergétique le font pour de nombreuses raisons qui évoluent avec le temps. Ces dernières années, les préoccupations concernant le climat, la rétention des employés et la réglementation ont gagné en importance.

(Sola *et al.*,2019) ont analysé les facteurs d'influence sur la gestion de l'énergie dans l'industrie du point de vue de l'économie, de la contingence et des changements technologiques et comportementaux. Le modèle final comprend huit facteurs répartis en trois groupes : organisationnel (stratégique, opérationnel), implication (motivation, soutien), moteurs (production, économie, compétitivité, environnement). Le facteur opérationnel s'est avéré avoir un effet positif sur les moteurs d'investissements dans l'efficacité énergétique, tandis que le facteur de production a été un moteur important pour améliorer l'efficacité énergétique, ce qui a eu un effet positif sur les processus organisationnels et les actions de gestion de l'énergie à poser.

Après avoir étudié l'état de l'art des stratégies contrôlant la consommation énergétique et la demande de pointe au sein de l'industrie en général, nous nous intéresserons aux scieries en particulier dans la prochaine question.

3.5 Comment peut-on contrôler la consommation d'énergie et l'appel de puissance au sein d'une scierie durant une journée de travail ?

En explorant la littérature scientifique à l'aide de mots clés tels que "sawmill", "lumber" et "energy eff*", rares sont les résultats qui présentent des études combinant l'efficience énergétique et le contrôle de la demande en puissance au sein d'une scierie. Il semble néanmoins que tout projet d'économie d'énergie peut débuter suivant un cadre de travail comme celui que propose (*Ecoinflow Final Project Report*, 2015). Ce cadre est composé de 7 étapes. Premièrement, il s'agit de nommer une équipe énergie pour chapeauter le projet, puis de définir une politique énergétique à suivre. Ensuite on effectue une revue énergétique qui consiste à surveiller les équipements et/ou les processus pour générer des profils de consommation mettant en relief les plus importants consommateurs d'énergie dans l'usine. Une telle revue amène à définir des objectifs énergétiques et un plan d'action pour mieux gérer l'énergie. Finalement, on s'assure que les activités quotidiennes sont à faible consommation en passant le mot au sein de l'entreprise. Ce projet vise principalement à faciliter l'implantation de bonnes pratiques et de nouvelles technologies favorisant l'économie de l'énergie consommée. L'étude englobe plusieurs pays européens avec différentes infrastructures, matières premières et technologies, mais une évaluation des performances énergétique de leurs unités de production a conduit au développement d'une méthodologie cohérente et partagée permettant une analyse à l'échelle européenne, tenant compte de la diversité de l'industrie du sciage.

Dans la même perspective, (Gopalakrishnan *et al.*, 2012) proposent un modèle basé sur l'analyse et le diagnostic énergétique afin de réduire la consommation d'énergie dans une scierie. Cette approche vise à faire le suivi de la consommation d'énergie de chaque équipement lors de leur fonctionnement par rapport à une valeur théorique attendue. Si l'écart est petit, l'équipement est considéré comme "*lean*" en termes d'utilisation d'énergie et si ce n'est pas le cas, alors des

efforts peuvent être investis pour réduire sa consommation le plus possible. De telles mesures ont permis de détecter des facteurs de différente nature pouvant influencer la quantité d'énergie consommée. Leur modélisation a notamment reposée sur une approche de prédiction (calcul théorique) de l'énergie consommée en considération le temps d'opération réel des machines, alors que le calcul des puissances demandées/ énergie consommée était basée sur divers paramètres associés à chacun des processus. (Devaru *et al.*, 2014) montrent que les essences de bois affectent la consommation d'énergie. Les essences les plus denses consomment plus d'énergie que les essences moins denses et la consommation d'énergie spécifique du bois franc est plus élevée que celle du bois résineux. L'analyse s'est basée sur des informations provenant de 3 scieries différentes en superposant des données énergétiques avec des données de production. La différence en termes d'efficacité énergétique d'une scierie à une autre était principalement expliquée par le rendement du moteur au sciage.

Dans une scierie type, une importante quantité d'énergie est consommée par les compresseurs d'air, l'éclairage, le processus de ventilation, le chauffage des espaces et le séchage du bois (Johnsson, 2019). La personnalisation des paramètres des équipements comme la réduction de la pression dans le système de compression d'air, la réduction du temps d'opération des compresseurs, l'optimisation du flux d'air de circulation dans les séchoirs, le préchauffage de l'air, l'isolation supplémentaire des séchoirs et le contrôle de la demande du flux d'air de séchage peuvent alors jouer un rôle clé dans une gestion plus efficiente de l'énergie (Johnsson, 2019). (Szwedzka *et al.*, 2016) ont d'ailleurs proposé une façon de générer des économies d'énergie pour une scierie. En optant pour l'isolation des chambres de séchage et des caloducs, ils ont montré qu'il devenait possible de raccourcir les phases du cycle de séchage, de minimiser l'utilisation des ventilateurs et d'augmenter la capacité de séchage.

Un processus de séchage approprié signifie également une bonne qualité du matériau séché et un prix final du produit plus intéressant (Szwedzka *et al.*, 2016). Dans la même perspective, (Anderson, 2013) s'intéresse à la biomasse pour la production de chaleur interne, principalement pour le séchage du bois dans les séchoirs. Il cherche à améliorer les technologies de chauffage dans une scierie comme l'échangeur de chaleur, la pompe à chaleur et le système d'absorption ouvert. Ces méthodes donnent des résultats positifs quant à la demande en chaleur, mais en contrepartie, on voit la consommation d'énergie électrique augmenter. La ventilation durant le séchage reste aussi un défi important du point de vue de la consommation d'énergie. (Meng *et al.*, 2019) ont conçu un appareil pour récupérer la chaleur perdue de l'air humide évacué pendant le séchage. Les résultats ont révélé que le temps de séchage et la consommation d'énergie diminuaient avec l'utilisation de ce dispositif d'économie d'énergie. La consommation électrique et énergétique a été réduite de 18,9% et 38,5% respectivement. Les rendements de récupération de la chaleur perdue variaient de 20,32% à 28,15%.

On peut conclure que même si certaines pistes d'amélioration ou d'actions ont été proposées par les auteurs en ce qui a trait aux équipements et opérations au sein d'une scierie, encore peu de travaux se sont penchés sur le sujet. Le paramètre temps s'est par ailleurs avéré absent dans les études considérées, alors qu'une planification des opérations de sciage intégrant la facette énergie n'a que très peu été étudiée. La notion d'appel maximal en puissance demeure pour sa part non explorée. Un intérêt demeure donc à mettre sur pied des outils pour concrétiser la gestion de l'énergie au sein des scieries et à assurer son intégration dans la gestion des opérations.

4 CONCLUSION

Dans cet article, nous nous sommes intéressés aux différentes stratégies opérationnelles à mettre de l'avant dans l'industrie pour mieux utiliser l'énergie, prendre en compte les pointes de demande et générer des gains substantiels en valorisant leur flexibilité pour participer aux programmes de GDP des utilités électriques. Un focus sur le secteur de la production de bois d'œuvre a aussi montré quelques approches prometteuses. Dans une ère 4.0 où des usines intelligentes se caractérisent par une communication continue entre leurs différents équipements, il devient alors d'autant plus prometteur de faire appel à toute l'information capturée pour mieux contrôler le système de production et faciliter la capacité d'autodiagnostic d'un point de vue énergétique. Il devient aussi nécessaire de réfléchir aux outils d'aide à la décision à mettre sur pied permettant de proposer des actions concrètes à poser afin de tendre vers un système de production plus efficient. Il demeure par ailleurs nécessaire de réfléchir à une façon d'intégrer les préoccupations environnementales et organisationnelles dans la prise de décision. L'efficacité énergétique et la flexibilité des procédés industriels auront un rôle important pour soutenir la décarbonisation et réduire les GES. L'industrie forestière exploitant une ressource naturelle essentielle pour l'équilibre de notre écosystème, elle ne peut que gagner à exploiter ce genre d'outils dans le futur.

REFERENCES

Abikarram, J.,K. McConky and R. Proano, 2018. Energy cost minimization for unrelated parallel machine scheduling under real time and demand charge pricing. *Journal of Cleaner Production*, 208, 232-242.

Anderson, J and L. Westerlund, 2013. Improved energy efficiency in sawmill drying system. *Applied Energy*, 113, 891-901.

Andersson E, O. Arfwidsson and P. Thollander, 2018. Benchmarking energy performance of industrial small and medium-sized enterprises using an energy efficiency, index: results based on an energy audit policy program. *Journal of Cleaner Production*, 182, 883-895.

Ashok, S, 2006. Peak-load management in steel plants. *Applied Energy*, 83, 413-424.

Boell. SK and D. Cecez-Kecmanovic, 2010. Literature Reviews and the Hermeneutic Circle, Australian Academic & Research Libraries, 41:2, 129-144.

Cui. WW, Li. L ; Lu. ZQ, 2019. Energy-efficient scheduling for sustainable manufacturing systems with renewable energy resources. *Naval Research Logistics*, 6, 154-173.

Dababneh. F, Li. L, Sun. ZY, 2016. Peak power demand reduction for combined manufacturing and HVAC system considering heat transfer characteristics. *International Journal of Production Economics*, 177, 44-52.

Dasheng Lee and Cheng. CC, 2016. Energy savings by energy management systems: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 56, 760-777.

Devaru. DG, R. Maddula, ST. Grushecky and B.Gopalakrishnan, 2014. Motor-Based Energy Consumption in West Virginia Sawmills. Forest Production Journal, 64, 33-40.

Dietmair A, Verl A, 2009. *Energy consumption forecasting and optimization for tool machines.* .66-67.

Drake. R, MB. Yildirim, JM Twomey, L. Whitman,J. Ahmad, L. Prashant 2005. Data Collection Framework On Energy Consumption In Manufacturing. *Institute of Industrial Engineering Research Conference, Orlando, FL*.

Dumont. LB, N. Lehoux, L Gosselin and H. Fortin, 2018. Gestion de la demande en puissance en milieu industriel : État de l'art et stratégies pour la production de bois d'œuvre, *Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation- MOSIM'18*, Toulouse, France.

Dumont. LB, P. Marier and N. Lehoux, 2019. Integrating electric energy cost in lumber production planning. *Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (IFAC MIM)*, GERMANY, p: 2249-2254.

Fédération Québecoise des municipalités. 2017 Portrait des économies de la forêt.

Fernandez. M, Li. L., ZY. Sun, 2013. "Just-for-Peak" buffer inventory for peak electricity demand reduction of manufacturing systems. *International Journal of Production Economics,* 146, 178-184.

Gahm. C ,F. Denz, M. Dirr, Tuma A, 2015. Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework. *European Journal of Operational Research*, 248: 3, 744-757.

Gopalakrishnan. B, Mardikar, Y., Gupta, D., Jalali, S. M and Chaudhari, 2012. "Establishing Baseline Electrical Energy Consumption in Wood Processing Sawmills for Lean Energy Initiatives: A Model Based on Energy Analysis and Diagnostics," *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 109:5, 40-80.

Gutowski. T, C. Murphy,D. Allen , D.Bauer, B. Bras, T. Piwonka, P. Sheng , J. Sutherland, D. Thurston, E. Wolff, 2005. Environmentally benign manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States. *Journal of Cleaner Production,* 13:1, 1-17.

Hydro Québec. 2019 Programme Gestion de la demande de puissance Guide du participant hiver 2019-2020 Marchés commercial et institutionnel ainsi que petites et moyennes entreprises industrielles.

International Energy Agency, 2019. Energy Efficiency.

Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2016 et leur évolution depuis 1990, Gouv. du Québec (MELCC), 2018

Johnsson. S, E. Andersson, P. Thollander, M. Karlsson, 2019. Energy savings and greenhouse gas mitigation potential in the Swedish wood industry. Energy, 187.

Kordonowy. D, 2002. A Power Assessment of Machining Tools. Thesis (S.B.), Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering. USA.

Li W, M. Winter, S. Kara and C. Herrmann, 2012. Eco-efficiency of manufacturing processes: a grinding case. *Cirp Annals Manufacturing Technology*, 61:1, 59-62.

Li, ZT, HD. Yang, SQ. Zhang, Liu, GS, 2016. Unrelated parallel machine scheduling problem with energy and tardiness cost. *International* Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84: 1-4, 213-226.

Liang, P., HD. Yang, GS. Liu, JH Guo, 2015. An ant optimization model for unrelated parallel machine scheduling with energy consumption and total tardiness. *Mathematical Problems in Engineering.*

Liu, Y.,HB. Dong, N. Lohse, S. Petrovic, N. Gindy, 2014. An investigation into minimizing total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. *Journal of Cleaner Production*, 65, 87-96.

Mativenga. PT, MF. Rajemi and S. Hinduja, 2011. Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint. *Cirp Annals Manufacturing Technology,* 60: 1, 149-152.

May. G, B. Stahl, M. Taisch and D. Kiritsis, 2017. Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1464-1489.

McKane, AT, MA. Piette, D. Faulkner, G. Ghatikar, A. Radspieler, Jr., B. Adesola, , Murtishaw, S. Kiliccote, 2008. Opportunities, Barriers and Actions for Industrial Demand Response in California *Demand Response Research Center*. US.

Meng. Y, GY. Chen, GH Hong, MJ. Wang, JM Gao ,Y. Chen, 2019 Energy efficiency performance enhancement of industrial conventional wood drying kiln by adding forced ventilation and waste heat recovery system : a comparative study. Maderas-Ciencia Y Tecnologia, 21: 4, 545-558.

Mostafa HA., R. El Shatshat, Salama. M.M.A., 2014. A Review on Energy Management Systems. *IEEE Pes T&D Conference and Exposition.*

Mouzon, G, MB. Yildirim, 2008. A framework to minimize total energy consumption and total tardiness on a single machine. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1:2, 105-116.

Mouzon, G,MB. Yildirim and J. Twomey, 2007. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. *International Journal of Production Research*, 45: 18-19, 4247-4271.

Murphy CF, GA. Kenig, DT. Allen, JP. Laurent, DE. Dyer, 2003. Development of parametric material, energy, and emission inventories for wafer fabrication in the semiconductor industry. *Environmental Science & Technology*, 37:23, 5373-5382.

Nadel., Steven, Who Invests in Energy Efficiency and Why?, July 24, 2017, https://www.aceee.org/blog/2017/07/who-invests-energy-efficiency-and-why

Newman ST, A. Nassehi, R Imani-Asrai, and V. Dhokia, 2012 Energy efficient process planning for CNC machining. *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology,* 5:2, 127-136.

Norwegian Institute of Wood Technology, SP, FCBA, Thünen Institute and InnovaWood.2015 Energy Management in the European Sawmill Industry, © Ecoinflow, Final Project Report.

Paulus. M, F. Borggrefe, 2011. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. *Applied Energy*, 88: 2, 432-441.

Richard, M.A., H. Fortin, A. Poulin, M.-A. Leduc and M. Fournier. 2017 Daily load clustering: A powerful tool for demand side management in medium-sized industries, *ACEEE summer study on energy efficiency in industry*, Denver, Colorado.

Ruzzelli A, C. Nicolas, A. Schoofs, and G. O'Hare, 2010. Real-Time Recognition and Profiling of Appliances through a Single Electricity Sensor. *IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, 1-9.

Sola, AVH and CMM. Mota, 2020. Influencing factors on energy management in industries, *Journal of Cleaner Production,* 248.

Swaminathan, V. and K. Chakrabarty, 2003.Energy-conscious, deterministic I/O device scheduling in hard real-time systems, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,* 22: 7, 847-858.

Swat M, T. Stock, D. Bähre, G. Seliger, 2013. Monitoring production systems for energy-aware planning and design of process chains. *11th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Innovative Solutions*. Germany. 649- 654

Szwedzka, K, J. Gruszka, and P. Szafer, 2016.Impact of technical and technological changes on energy efficiency of production company - case study. *Modtech International Conference* . 145.

Thiede, S, G. Bogdanski and C. Herrmann, 2012. A systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies. *CIRPE* 1st., 2, 28-33.

Tranfield, D, D. Denyer, , and P. Smart, 2003, Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review", *British Journal of Management*. 14:3, 207–222.

Whitmore, J. et P.-O. Pineau, 2020. État de l'énergie au Québec 2020, Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal, préparé pour Transition énergétique Québec, Montréal.

Yildirim MB and FG. Nezami, 2014. Integrated maintenance and production planning with energy consumption and minimal repair. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74: 9-12, 1419-1430.

Yildirim, MB. and G. Mouzon, 2011. Single-Machine Sustainable Production Planning to Minimize Total Energy Consumption and Total Completion Time Using a Multiple Objective Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Engineering Management,* 59:4, 585-597.

Zeng. YZ, A. Che and XQ Wu, 2018. Bi-objective scheduling on uniform parallel machines considering electricity cost. *Engineering Optimization*, 50:1, 19-36

Zhao. GY, GY. Zhao, ZY. Liu, Y. He, HJ. Cao, YB. Guo, 2017. Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy. Energy, 133, 142-157.

13the International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'20 – November 12-14, 2020- Agadir – Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

TOWARD APPLICATION OF REAL-TIME VIDEO STREAMS IN PRODUCTION PLANNING AND CONTROL: A CONCEPTUAL FRAMEWORK

M.PADIDAR, S. KEIVANPOUR, M. BEN ALI

Department of Mathematics and Industrial Engineering, Polytechnique Montreal, Montreal, Canada
marjan.padidar@polymtl.ca, samira.keivanpour@polymtl.ca, maha.ben-ali@polymtl.ca

ABSTRACT: Today's manufacturing industry has become more and more complex and dynamic. Hence, flexibility and efficiency throughout the production process are essential. Industry 4.0 provides a solution to cope with these challenges through large data sets coming from the manufacturing process. Moreover, applying machine learning techniques such as deep learning to process the industrial big data can support real-time decision making in different aspects of smart manufacturing. This research develops a conceptual framework to discuss the role of live video streams in providing process knowledge to realize real-time production planning and control. The application's perspectives in lead-time prediction, monitoring and control, scheduling, and simulation are discussed.

KEYWORDS: *Industry 4.0, Smart Manufacturing, Production Planning and Control, Real-Time Video Streams.*

1 INTRODUCTION

The most important challenges of today's manufacturing systems are dealing with complexity and uncertainty and adapting to a dynamic environment. The complexity is attributed to to-be-manufactured products, manufacturing processes, and collaborative networks (Wuest, *et al.*, 2016). Uncertainty refers to environmental and system changes which can cause disturbance in the manufacturing process (Wazed, *et al.*, 2009). Manufacturing data collected from manufacturing processes is considered as the most valuable asset of manufacturing to overcome these challenges. To benefit from this asset, it is essential to find highly complex and non-linear patterns in data and transform it into knowledge and information (Wuest, *et al.*, 2016).

Smart manufacturing requires real-time data analysis to facilitate rapid and accurate decision making in the dynamic environment of today's manufacturing (Tao, *et al.*, 2018, Zheng, *et al.*, 2018). Nowadays, finding a timely and cost-effective approach to gain insight into the available data is the most important challenge (Rodríguez-Mazahua, *et al.*, 2016). Different methods were proposed in the literature to deal with structured data (Gong and Caldas, 2010) and limited amounts of unstructured data such as images (Andrianakos, *et al.,* 2019), while more complex unstructured data such as real-time videos has not received enough attention.

Video streams in manufacturing enable real-time monitoring of the manufacturing process. Applying deep learning techniques to analyze these streams and extract knowledge supports real-time decision making in production planning and control and creates manufacturing intelligence. Generated intelligence can in turn result in better performance of production system in terms of quality, time, cost, and flexibility (Mittal, *et al.*, 2020).

To the best of our knowledge there is not any systematic review on the application of video streams on manufacturing planning and control. This study aims to survey the application of video streams in smart manufacturing and takes a step toward highlighting its role in generating manufacturing intelligence via a conceptual framework including physical, cyber and application layers.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 discusses the characteristics of big data and its role in the fourth industrial revolution. Section 3 highlights some information about real-time video-streams. Section 4 describes our proposed framework in detail and analyzes the necessity and benefits of applying that in three important areas of manufacturing including lead time prediction, monitoring and control, and scheduling. Section 5 concludes with some remarks and future research prospects.

2 INDUSTRY 4.0 AND BIG DATA

Four waves of technological progress have fundamentally upended traditional manufacturing approaches, which are called revolution. (Lasi, *et al.*, 2014). The first industrial revolution is driven by water and steam power. The second industrial revolution depended on electric power for mass production. The trigger for the third industrial revolution was Information Technology (Yin and Kaynak, 2015). The German Governments called the fourth industrial revolution as Industry 4.0 (Yin and Kaynak, 2015) because it originated from an advanced manufacturing vision project supported by the German government in 2011 (Xu and Duan, 2019). Industry 4.0 has been appeared to develop completely automated and intelligent production systems by sharing data (Piccarozzi, *et al.*, 2018). Generated data by machines and devices, business management, etc. called big data and considered as the fuel of the fourth

industrial revolution (Yin and Kaynak, 2015). "5V" characteristics of big data including volume, velocity, variety, veracity, and value (Yan, *et al.*, 2017) distinguish it from "very large data" or "massive data" (Yin and Kaynak, 2015). The importance of volume in big data is related to the fact that the more data is available, the more trustworthy the estimation that can be achieved. The veracity of big data is of particular importance since data processing must be accomplished faster than data generation, otherwise, must such of data will be wasted. The variety of big data is important because patterns can be more easily identified through different perspectives. The veracity of big data refers to the need for accuracy to avoid making decisions based on incorrect data. The value of big data determines the final gain which can be obtained from data. (Xu and Duan, 2019) In other words, the value of big data does not lie in its sheer volume but in its hidden potential information and knowledge (Tao, *et al.*, 2018).

The Industry 4.0 concept in the manufacturing sector includes diverse applications from product design to logistics (Zheng, *et al.*, 2018). Big data can be acquired from different various sources such as humans, machinery, and manufacturing process. This data can be classified into three different categories: 1) Structured data with a structural format which is understandable for human and storable in rational databases. 2) Semi-structured without a structural format and weaker ability to store compared to structured data 3) Unstructured data without a pre-defined structure, which can contain both textual and non-textual data such as image, audio, and video (Gupta, *et al.*, 2017). Statistical methods is used very often to analyze big data since are they are based on probability theory and perform well for small data sets (Gupta, *et al.*, 2017). Data mining algorithms have been widely applied in the literature to process big data sets for pattern discovery and extraction. These techniques mostly focus on structured data formats and face challenges when processing semi-structured and unstructured data due to their uncertain format (Khan, *et al.*, 2014, Siddiqa, *et al.*, 2016). Processing unstructured data is expensive and difficult. It requires conversion to structured data and development of large-scale machine learning techniques (Chen, *et al.*, 2014, Siddiqa, *et al.*, 2016, Gupta, *et al.*, 2017). Video is the most complex type of unstructured data, as it can simultaneously contain audio, video, and text. Video analytics, therefore, requires analysis techniques of all other types of unstructured data such as audio classification, image recognition, etc. (Hou, *et al.*, 2020). Among data scientists, deep learning is a popular class of machine learning techniques to process videos with higher accuracy and much better performance (Bathla *et al.*, 2020 and Mathew, *et al.*, 2020, Xu, *et al.*, 2020).

On the other hand, data processing can be performed both offline and in real-time concerning the requirements on response time (Chen, *et al.*, 2014). Data received in real-time is more valuable for manufacturers at the time it arrives and can support decision making more efficiently (Tantalaki, *et al.*, 2019). Nowadays, the importance of retrieval information from real-time data is similar to the importance of extracting knowledge from databases several years ago (Angelov, 2012). Therefore, the necessary condition of smart manufacturing is to extract comprehensive information and knowledge from industrial data in real-time, which leads to increased manufacturing competitiveness (Tao, *et al.*, 2018), and more efficient management and control of manufacturing process (Yan, *et al.*, 2017). Applying large amounts of manufacturing data with different formats such as video, audio in various studies can easily prove the importance of big data in the manufacturing environment.

3 REAL-TIME VIDEO STREAMS

There are many streams of data in today's manufacturing (Angelov, 2012). Among those, video streams can potentially improve productivity. They consist records that captures actual operation times and indicate all the abnormalities during the operation (Gong and Caldas, 2010). They play an important role in industrial inspection systems.

Real-time video processing technology has improved significantly in recent years. In addition to hardware developments for video processing, considerable development can be considered for its application (Kehtarnavaz and Gamadia, 2006). The worthy and accurate information that can be extracted from real-time videos makes automated data interpretation technology interesting subject for both manufacturers and researchers (Gong and Caldas, 2010).

Traffic surveillance, for instance, has experienced considerable advancement with the emergence of traffic video surveillance systems (Vishnu, *et al.*, 2018). Video-based gesture recognition is another promising application of this technology in the automotive industry, which increases drivers' comfort and maintains their safety (John, *et al.*, 2016).

Machine learning algorithms have been widely applied for processing videos. Traditional algorithms such as computer-aided algorithms require strong supervision when detecting patterns in videos (Quellec, *et al.*, 2017). In recent years, deep learning algorithms received greater attention for video processing, since they can be applied with or without supervision. They consist of many hidden layers and numerous neurons. This multilayer architecture helps to handle big video data with high accuracy (Abbas, *et al.*, 2019) and progressively learn features from data at multiple levels (Mathew, *et al.*, 2020)

4 PROPOSED CONCEPTUAL FRAMEWORK

Industrial leaders require valid techniques to effectively plan and control real-time production systems (Cheng, *et al.*, 2019) to improve competitiveness and decrease the cost of manufacturing. Analyzing real-time data of the

manufacturing process provides an opportunity for supporting real-time decision making and generating manufacturing intelligence which improves the efficiency of production systems. In the following, we propose a conceptual framework for the field of smart manufacturing using state-of-the-art methods of data analysis and simulation to digitalize tacit knowledge of manufacturing and realize data-enabled production planning and control.

Figure 1 illustrates the proposed framework consisting of three main layers: physical layer, cyber level (including data and simulation layer), and application layer. The physical layer is responsible for physical space of manufacturing and represents all manufacturing resources involved in real process of manufacturing. Human operators, machines, and production processes of various products are important entities in manufacturing (Tao, *et al*., 2019) which cause complexity in production planning and control. Manufacturing entities are dynamically affected by external factors such as dynamic environment and customers. Customized products, order changes, and emergency events make manufacturing entities exposed to more randomness, abnormalities, and complexity, consequently increasing the importance of real-time monitoring of real manufacturing environments. Different technologies can be applied in physical layer to record events related to manufacturing entities such as RFID, 3D sensors, cameras, etc. In the proposed framework, we focus on real-time video streams.

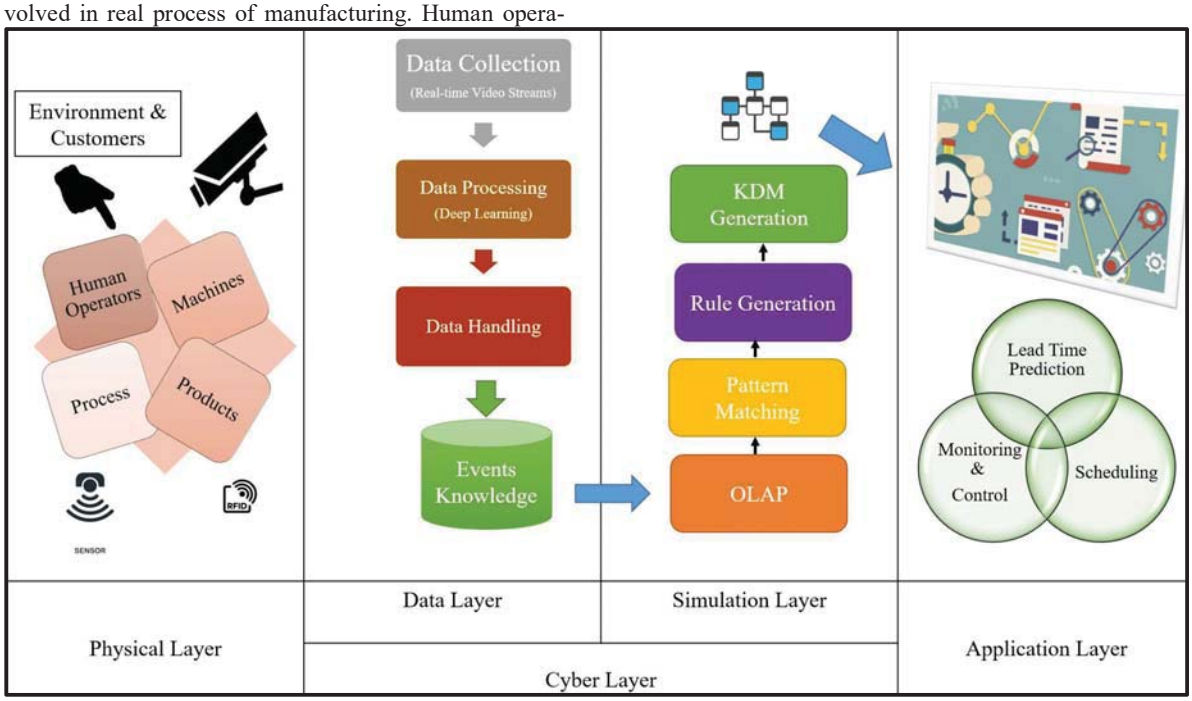


Figure 1: The architecture of the proposed conceptual framework

The cyber layer includes the data layer and the simulation layer. Manufacturing data collection and analysis are key factors in data layer to realize data-driven operations. Many researchers tried to incorporate these important components into modern manufacturing, while they do not pay that much attention to improving them. Sensors have been considered in most of the studies to collect manufacturing data (Xu, *et al.*, 2020). In this study, collecting data via real-time video streams is proposed. These streams can keep track of the manufacturing process through collecting sequential data from manufacturing processes such as machines, material flows, etc. (Xu, *et al.*, 2020). Recorded data contains a large volume of the valuable manufacturing process such as operation times, machine failures, human errors, process abnormalities, and so forth. This data can be collected continuously and updated regularly which makes data stream analysis more challenging and interesting for researchers. To cope with the high complexity of data streams in terms of volume and speed of input data, intelligent data-handling is required. This technique can facilitate data analysis and guarantee the quality of data processing results in the next step (Kholghi and Keyvanpour, 2011). Deep learning technique is proposed for processing data stream in this layer because it can learn how to extract useful features automatically without human intervention (Xu, *et al.*, 2020). Extracted features are considered as the accurate knowledge of manufacturing events which is required for the next layer.

In the simulation layer, simulation models of manufacturing processes are needed to evaluate and compare different rules without disturbing the manufacturing process. In the framework, we proposed dynamic process mining techniques to generate simulation models instead of

model generation through traditional data sources, because of their greater computability with the real process (Martin, *et al,* 2014). The dynamic approach provides an opportunity to register event logs during the process and discover a more accurate business process. According to Pérez-Castillo*, et al* (2011), four steps are considered for the dynamic process mining: QVT (Query, View, and Transformation), pattern matching, rule generation, and knowledge discovery Meta-model (KDM) generation. Collected event logs of the manufacturing process must be transformed into decision support data to create business intelligence. QVT performs this task and makes data available from data warehouses to users. Online analytical processing (OLAP) technique is proposed to be applied in the QVT step due to the ability of multi-dimensional and multi-level analysis on a large volume of data (Queiroz-Sousa and Salgado, 2019, Kaur and Kaur, 2019). It can collect, transform, and summarize data to create Business Intelligence through specific operations (Patil and Gangadhar, 2016). Slicing /dicing, drill-down, and roll-up are considered as the most important OLAP operations in the literature. These operations provide aggregated data visualization with different perspectives (Queiroz-Sousa and Salgado, 2019). Slicing/dicing determines a particular aspect of data. Roll up provides a brief overview of data and drill-down prepares data with details considering user's preferences (Chen, *et al.*, 2009). Pattern-matching then aims to correctly link the particular data in the event warehouse to a running process by exploring the correlation between different events. Mapping generates if-then rules in the manufacturing system. These rules have great importance for coping with uncertainties in the manufacturing process. Consequently, a process model is built automatically from event logs (De Medeiros, *et al.*, 2007) which is called simulation knowledge discovery meta-model. This model can be updated automatically by utilizing comprehensive events information obtained from real-time video streams and realizing data-driven simulation. It supports the assessment of more complex manufacturing scenarios considering numerous process rules and overcomes weakness of the other simulation methods such as Discrete Event simulations, System Dynamics, and Agent-Based simulations (Goodall, *et al,* 2019). Consequently, simulation results benefit from a higher degree of realism and result in more efficient solutions to manufacturing problems.

The application layer represents practical manufacturing applications (Tao, *et al.*, 2019). In the application layer of our proposed platform, knowledge coming from previous layers will be utilized to develop a more dynamic and smart production planning and control system i.e. smart manufacturing assistants in three important areas of production planning and control: lead time prediction, monitoring and control, and scheduling.

4.1 Lead Time Prediction

According to Gyulai, *et al.*, (2019), "the accurate lead time (LT) prediction is a key factor in successful production planning and control", since any earliness or tardiness in delivery leads to an increase in the cost of production and a decrease in the firm competitiveness (Wang and Jiang, 2019). Predicting LT is a hard challenge for manufactures considering the constantly changing product and production lines (Onaran and Yanık, 2019). LT is affected by several factors including process parameters (Gyulai, *et al.*, 2019), shop congestion (Öztürk, *et al.*, 2006) and dispatching rules (Öztürk, *et al.*, 2006). The complexity of the production process (Onaran and Yanık, 2019) and customized products (Gyulai, *et al.*, 2019) increase the difficulty of accurate lead time prediction.
Analytical methods available in the literature, such as Little's Law, cannot be applied when a great variation of products and process parameters need to be addressed, while data analytics and machine learning methods are proven to be efficient in such a situation (Gyulai, et al., 2019). However, these methods mostly focus on structured data, ignoring unstructured data such as audio, images, and video. Employing real-time videos as direct observations of operations and processing them using deep learning techniques can provide exhaustive and precise information about the manufacturing process. Using this information to predict LT enables us to develop a real-time production controller and to increase the reliability of control decisions such as due-date assignment and order prioritization.

4.2 Monitoring and Control

Although machines replaced humans in many operations due to the industrial revolution, there is still a high amount of assembly operations that are carried out manually (Andrianakos, *et al.*, 2019). These assembly operations are complex and require human flexibility and intelligence (Tarallo, *et al.*, 2018). The more complex assembly processes and variation of products, the more need for human operators (Kaczmarek, *et al.*, 2015). In practice, these operators must operate various actions and employ different hand-held equipment simultaneously. They must perform their tasks based on planned procedures and particular orders since any incorrect assembly operation leads to loss of quality, rework or rejection the product, resulting in higher total manufacturing cost (Andrianakos, *et al.*, 2019). Therefore, there is a need to monitor human operators' activities during the assembly process.

Tools for monitoring assembly process track humans to judge whether operations were performed correctly and thus detect mistakes (Tarallo, *et al.,* 2018). Hence, human-related errors can be distinguished at the early stages of assembly (Gong and Caldas, 2010). Traditional methods of monitoring assembly operations used direct observation of the assembly process, which is time-consuming, error-prone, and labor-intensive (Yang, *et al.*, 2015). Dif-

ferent 3D image sensors-based techniques, such as Kinect, have also been used by researchers to track human operators. These techniques require certain gestures of workers in a specific place to understand that the task is performed (Weichert, *et al.*, 2019). Recently, vision sensors, such as 2D images and machine learning techniques are being applied to automatically monitor the execution of human-based assembly operations (Weichert, *et al.*, 2019). These images are not generic enough to be applied in the industrial environment (Andrianakos, *et al.,* 2019). In practice, more images of the assembly process are required (Andrianakos, *et al.,* 2019). Real time data is required to avoid sudden interruptions in manufacturing process (Angelopoulos, *et al.,* 2020). Video streams as a worthy source of data can detect abnormalities of the process (Gong and Caldas, 2010). Video stream analysis through deep learning techniques, as valid approaches for processing complex data sets and retrieval information (Shokri and Shmatikov, 2015), helps to develop an active monitoring controller.

4.3 Scheduling

Scheduling as an important optimization problem focuses on assigning the available resources, such as machines and human operators, to manufacturing processes at particular times to minimize makespan or/and cost (Zhang, *et al.,* 2019). Since this problem has a direct effect on production efficiency and manufacturing cost, many scheduling algorithms have been presented in the literature (Zhang, *et al.,* 2019). Small size production scheduling problems can be solved optimally by mathematical optimization, while for large-scale problems, local optimization is applied, potentially leading to sub-optimal solutions (Waschneck, *et al.,* 2018). Structures of traditional scheduling algorithms are far from the real manufacturing environment and fail to respond to real-time changes (Waschneck, *et al.,* 2018, Zhang, *et al.,* 2019). This limitation results from unpredictable real-time events during the manufacturing process, such as order cancelations, machine failures, and emergency events (Ouelhadj and Petrovic, 2009, Zhang, *et al.,* 2019). In such circumstances, previous feasible schedules lose their optimality and turn into infeasible ones (Zhang and Wong, 2017). Rescheduling is then required, but can cost more time and impose severe disruptions to a manufacturing process (Zhang, *et al.,* 2019).

Among different developed techniques in the literature for scheduling in the presence of real-time events, multi-agent systems showed better performance due to their dynamic nature and robustness against failure (Ouelhadj and Petrovic, 2009). In this context, each agent is responsible for responding to local conditions and interacting with other agents to achieve optimal and robust schedules (Ouelhadj and Petrovic, 2009). Therefore, combining new learning techniques with multi-agent systems (which have self-decision-making capacity) is demanded in smart scheduling. Agents can learn how to address major issues of real-time rescheduling, and especially how and when to react to real-time events through deep learning techniques (Zhang and Wong, 2017). As a result, they could predict, construct, and solve their scheduling model concerning real-time changes. Using real-time video streams to train these agents can endow the scheduling system with high flexibility and robustness.

4.4 Real-time Simulation

The complexity of the manufacturing process and customer-specific variations lead to drastic changes in planning and control manufacturing approaches (Wenzel and Peter, 2017, Lugaresi and Matta, 2018). Simulation, as one of the Industry 4.0 revolution pillars, has gained the greatest importance in this context (Lugaresi and Matta 2018). Digital twins, defined as a digital replica of a physical entity, provide an opportunity to gain insight into complex systems, evaluate alternative rules and designs, without disturbing the real system (Mourtzis, 2020).

The development of computer technology made both deterministic and stochastic real-time simulation possible for real-time production control (Kuffel, *et al.,* 2016, Lugaresi and Matta, 2018). Literature is rich in applications of real-time simulation in manufacturing (Lugaresi and Matta, 2018) from training and assisting human operators (Sharma, *et al.,* 2019, Bruno, *et al.,* 2019) or robots (Papadopoulos, *et al.,* 2017, Li, *et al.,* 2020) to throughput analysis and production scheduling (Hosseinpour and Hajihosseini, 2009). Data collection is the first important step in simulation. Although this step has been widely discussed in the literature, real-time complexity coming from big streams of data has been neglected and intelligent data-handling units are still required (Lugaresi and Matta, 2018).

Model generation is the second important step in the simulation of manufacturing systems. (Lugaresi and Matta, 2018). Simulation models can be generated through process documentation, experts' interview, and process observation. Traditional information sources cannot provide simulation models with appropriate real process compatibility. Due to the importance of realism degree of simulation models, analyzing data related to the real process can provide useful insights (Martin, *et al,* 2014). Process mining is a recent technique for generating a simulation model based on the record of manufacturing events (Wenzel and Peter, 2017). Focusing on streams of data is a promising field of research, that can provide a sufficient level of events availability, but it has not yet received enough attention (Wenzel and Peter, 2017, Lugaresi and Matta, 2018). Applying real-time video streams challenges us face the high complexity of big data streams and develop intelligent data handling units. The sufficient level of recorded events of the manufacturing process can be also applied to generate a dynamic simulation model. Consequently, tacit knowledge of manufacturing can be interestingly transformed and digitalized, potentially overcoming one of the most important challenges of new simulation approaches.

5 CONCLUSION AND FUTURE WORK

The manufacturing industry has faced increasing complexity and uncertainty in the last years. To improve firm competitiveness and manufacturing efficiency, it is important to support production managers in real-time decision making by valorizing real-time large data sets captured from manufacturing processes.

In this research, we propose a conceptual framework for realizing data-enabled manufacturing. This framework considers real-time video streams as a valuable source of real-time data, which can be processed by deep learning techniques to provide rich knowledge of manufacturing events. This tacit knowledge can generate simulation models through dynamic process mining techniques and offer manufacturing intelligence needed to support decision making in three important domains of production planning and control.

This study considers only a small portion of the potential information hidden in live video-streams, the tip of the iceberg. In future work, a case study of the proposed framework can be addressed to validate it and study its effects on a real industrial environment. Applying this framework in other optimization manufacturing domains is also interesting.

ACKNOWLEDGMENT

The authors of this article would like to thank Polytechnique Montréal for the start-up research grant for new faculty members (PIED).

REFERENCES

Abbas, Q., Ibrahim, M.E. and Jaffar, M.A., 2019. A comprehensive review of recent advances on deep vision systems. *Artificial Intelligence Review*, 52(1), p.39-76

Andrianakos, G., Dimitropoulos, N., Michalos, G. and Makris, S., 2019. An approach for monitoring the execution of human based assembly operations using machine learning. *Procedia CIRP*, 86, p.198-203

Angelopoulos, A., Michailidis, E.T., Nomikos, N., Trakadas, P., Hatziefremidis, A., Voliotis, S. and Zahariadis, T., 2020. Tackling Faults in the Industry 4.0 Era—A Survey of Machine-Learning Solutions and Key Aspects. *Sensors*, *20*(1), p.109.

Angelov, P., 2012. *Autonomous learning systems: from data streams to knowledge in real-time*. John Wiley & Sons.

Bathla, G., Aggarwal, H. and Rani, R., 2020. Deep Learning for Big Data Analytics. In *Advances in Computing and Intelligent Systems* (p. 391-399). Springer, Singapore.

Bruno, F., Barbieri, L., Marino, E., Muzzupappa, M. and Colacino, B., 2019, September. A Handheld Mobile Augmented Reality Tool for On-Site Piping Assembly Inspection. *International Conference on Design, Simulation, Manufacturing*: *The Innovation Exchange* (p. 129-139). Springer, Cham.

De Medeiros, A.K.A., Weijters, A.J. and van der Aalst, W.M., 2007. Genetic process mining: an experimental evaluation. *Data Mining and Knowledge Discovery*, *14*(2), p.245-304.

Chen, C., Yan, X., Zhu, F., Han, J. and Philip, S.Y., 2009. Graph OLAP: a multi-dimensional framework for graph data analysis. *Knowledge and information systems*, *21*(1), pp.41-63.

Chen, M., Mao, S. and Liu, Y., 2014. Big data: A survey. *Mobile networks and applications*, 19(2), p.171-209.

Cheng, Y., Chen, K., Sun, H., Zhang, Y. and Tao, F., 2018. Data and knowledge mining with big data towards smart production. *Journal of Industrial Information Integration*, 9, p.1-13

Gong, J. and Caldas, C.H., 2010. Computer vision-based video interpretation model for automated productivity analysis of construction operations. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(3), p.252-263.

Goodall, P., Sharpe, R. and West, A., 2019. A data-driven simulation to support remanufacturing operations. *Computers in Industry*, *105*, pp.48-60.

Gupta, A., Anand Shankar, S. and Manjunath, C., 2017. A comparative study on data extraction and its processes. *International Journal of Applied Engineering Research*, *12*(18), p.7194-7201.

Gyulai, D., Pfeiffer, A., Nick, G., Gallina, V., Sihn, W. and Monostori, L., 2018. Lead time prediction in a flow-shop environment with analytical and machine learning approaches. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), p.1029-1034.

Hosseinpour, F. and Hajihosseini, H., 2009. Importance of simulation in manufacturing. *World Academy of Science, Engineering and Technology,* 51(3), p.292-295.

Hou, R., Kong, Y., Cai, B. and Liu, H., 2020. Unstructured big data analysis algorithm and simulation of Internet of Things based on machine learning. *Neural Computing and Applications*, p.1-9.

John, V., Boyali, A., Mita, S., Imanishi, M. and Sanma, N., 2016, November. Deep learning-based fast hand gesture recognition using representative frames. *2016 International Conference on Digital Image*

Computing: Techniques and Applications (DICTA) (p. 1-8). IEEE.

Kaur, H. and Kaur, G., 2019. Comprehensive Survey of OLAP Models. In *Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms* (p. 415-422). Springer, Singapore

Kaczmarek, S., Hogreve, S. and Tracht, K., 2015. Progress monitoring and gesture control in manual assembly systems using 3D-image sensors. *Procedia Cirp,* 37, p.1-6

Kehtarnavaz, N. and Gamadia, M., 2006. Real-time image and video processing: from research to reality. *Synthesis Lectures on Image, Video & Multimedia Processing*, 2(1), p.1-108

Khan, N., Yaqoob, I., Hashem, I.A.T., Inayat, Z., Mahmoud Ali, W.K., Alam, M., Shiraz, M. and Gani, A., 2014. Big data: survey, technologies, opportunities, and challenges. *The scientific world journal*, *2014*.

Kholghi, M. and Keyvanpour, M., 2011. An analytical framework for data stream mining techniques based on challenges and requirements. *arXiv preprint arXiv:1105.1950*.

Kuffel, R., Forsyth, P. and Peters, C., 2016. The role and importance of real time digital simulation in the development and testing of power system control and protection equipment. *IFAC-PapersOnLine,* 49(27), p.178-182

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T. and Hoffmann, M., 2014. Industry 4.0. Business & information systems engineering, 6(4), p.239-242

Li, X., He, B., Zhou, Y. and Li, G., 2020. Multisource Model-Driven Digital Twin System of Robotic Assembly. *IEEE Systems Journal*.

Lugaresi, G. and Matta, A., 2018, December. Real-time simulation in manufacturing systems: Challenges and research directions. *2018 Winter Simulation Conference (WSC)* (p. 3319-3330). IEEE

Lugaresi, G., Zanotti, M., Tarasconi, D. and Matta, A., 2019, October. Manufacturing Systems Mining: Generation of Real-Time Discrete Event Simulation Models. *2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)* (p. 415-420). IEEEMartin, N., Depaire, B. and Caris, A., 2014, December. The use of process mining in a business process simulation context: Overview and challenges. *2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM)* (p. 381-388). IEEE

Mathew, A., Amudha, P. and Sivakumari, S., 2020, February. Deep Learning Techniques: An Overview. In *International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications* (p. 599-608). Springer, Singapore.

Mittal, S., Khan, M.A., Purohit, J.K., Menon, K., Romero, D. and Wuest, T., 2020. A smart manufacturing adoption framework for SMEs. *International Journal of Production Research*, *58*(5), pp.1555-1573.

Mourtzis, D., 2020. Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends. *International Journal of Production Research*, 58(7), p.1927-1949.

Onaran, E. and Yanık, S., 2019. Predicting cycle times in textile manufacturing using artificial neural network. *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems,* Springer, Cham, p. 305-312.

Ouelhadj, D. and Petrovic, S., 2009. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *Journal of scheduling*, 12(4), p.417

Öztürk, A., Kayalıgil, S. and Özdemirel, N.E., 2006. Manufacturing lead time estimation using data mining. *European Journal of Operational Research*, 173(2), p.683-700

Papadopoulos, C., Mariolis, I., Topalidou-Kyniazopoulou, A., Piperagkas, G., Ioannidis, D. and Tzovaras, D., 2017, September. An Advanced Human-Robot Interaction Interface for Teaching Collaborative Robots New Assembly Tasks. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics* (p. 180-190). Springer, Cham.

Patil, A.D. and Gangadhar, N.D., 2016, October. OLaaS: OLAP as a Service. In *2016 IEEE International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets (CCEM)* (pp. 119-124). IEEE.

Pérez-Castillo, R., de Guzmán, I.G.R., Piattini, M., Weber, B. and Places, Á.S., 2011, March. An empirical comparison of static and dynamic business process mining. In *Proceedings of the 2011 ACM Symposium on Applied Computing* (pp. 272-279)

Piccarozzi, M., Aquilani, B. and Gatti, C., 2018. Industry 4.0 in management studies: A systematic literature review. Sustainability, 10(10), p.3821

Quellec, G., Cazuguel, G., Cochener, B. and Lamard, M., 2017. Multiple-instance learning for medical image and video analysis. *IEEE reviews in biomedical engineering,* 10, p.213-234

Queiroz-Sousa, P.O. and Salgado, A.C., 2019. A review on olap technologies applied to information networks. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*, *14*(1), p.1-25.

Rodríguez-Mazahua, L., Rodríguez-Enríquez, C.A., Sánchez-Cervantes, J.L., Cervantes, J., García-Alcaraz, J.L. and Alor-Hernández, G., 2016. A general perspective of Big Data: applications, tools, challenges and trends. *The Journal of Supercomputing*, 72(8), p.3073-3113

Sharma, S., Bodempudi, S.T., Arrolla, M. and Upadhyay, A., 2019, December. Collaborative Virtual Assembly Environment for Product Design. *2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)* (p. 606-611). IEEE.

Shokri, R. and Shmatikov, V., 2015, October. Privacy-preserving deep learning. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGSAC conference on computer and communications security* (p. 1310-1321)

Siddiqa, A., Hashem, I.A.T., Yaqoob, I., Marjani, M., Shamshirband, S., Gani, A. and Nasaruddin, F., 2016. A survey of big data management: Taxonomy and state-of-the-art. *Journal of Network and Computer Applications*, *71*, p.151-166.

Tantalaki, N., Souravlas, S. and Roumeliotis, M., 2019. A review on big data real-time stream processing and its scheduling techniques. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, p.1-31

Tao, F., Qi, Q., Liu, A. and Kusiak, A., 2018. Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, p.157-169.

Tao, F., Zhang, M. and Nee, A.Y.C., 2019. *Digital twin driven smart manufacturing*. Academic Press.

Tarallo, A., Mozzillo, R., Di Gironimo, G. and De Amicis, R., 2018. A cyber-physical system for production monitoring of manual manufacturing processes. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 12(4), p.1235-1241

Vishnu, V.M., Rajalakshmi, M. and Nedunchezhian, R., 2018. Intelligent traffic video surveillance and accident detection system with dynamic traffic signal control. *Cluster Computing*, 21(1), p.135-147.

Wang, C. and Jiang, P., 2019. Deep neural networks based order completion time prediction by using real-time job shop RFID data. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(3), p.1303-1318.

Waschneck, B., Reichstaller, A., Belzner, L., Altenmüller, T., Bauernhansl, T., Knapp, A. and Kyek, A., 2018. Optimization of global production scheduling with deep reinforcement learning. *Procedia CIRP*, 72(1), p.1264-1269

Wazed, M., Ahmed, S. and Nukman, Y., 2009. Uncertainty factors in real manufacturing environment. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences,* 3(2), p.342-351

Weichert, D., Link, P., Stoll, A., Rüping, S., Ihlenfeldt, S. and Wrobel, S., 2019. A review of machine learning for the optimization of production processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(5-8), p.1889-1902

Wenzel, S. and Peter, T., 2017. Transformation of Real-time Reporting Event Data to Long-term Simulation Models. *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, p.393.

Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C. and Thoben, K.D., 2016. Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, 4(1), p.23-45

Xu, L.D. and Duan, L., 2019. Big data for cyber physical systems in industry 4.0: a survey. *Enterprise Information Systems*, 13(2), p.148-169

Xu, K., Li, Y., Liu, C., Liu, X., Hao, X., Gao, J. and Maropoulos, P.G., 2020. Advanced Data Collection and Analysis in Data-Driven Manufacturing Process. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, *33*(1), p.1-21.

Yan, J., Meng, Y., Lu, L. and Li, L., 2017. Industrial big data in an industry 4.0 environment: Challenges, schemes, and applications for predictive maintenance. *IEEE Access*, *5*, p.23484-23491

Yang, J., Park, M.W., Vela, P.A. and Golparvar-Fard, M., 2015. Construction performance monitoring via still images, time-lapse photos, and video streams: Now, tomorrow, and the future. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), p.211-224.

Yin, S. and Kaynak, O., 2015. Big data for modern industry: challenges and trends [point of view]. *Proceedings of the IEEE*, 103(2), p.143-146.

Zhang, S. and Wong, T.N., 2017. Flexible job-shop scheduling/rescheduling in dynamic environment: a hybrid MAS/ACO approach. *International Journal of Production Research*, 55(11), p.3173-3196

Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S. and Fu, J., 2019. Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(4), p.1809-1830

Zheng, P., Sang, Z., Zhong, R.Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarok, K., Yu, S. and Xu, X., 2018. Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual

framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), p.137-150

Maritime risks taxonomy: A structured literature review of maritime risks classification

A. Cheik OUEDRAOGO
B. Sina NAMAKIARAGHI
E. Didier GOURC

Universite de Toulouse
IMT Mines Albi-Carmaux, Centre Genie Industriel
Albi - France
A. cheik.ouedraogo@mines-albi.fr, B. sina.namakiaraghi@mines-albi.fr
D. aurelie.montarnal@mines-albi.fr, E. didier.gourc@mines-albi.fr

C. Cedric ROSEMONT
D. Aurelie MONTARNAL

Maritime Transport
Next4
Toulouse - France
C. contact@next4.io

ABSTRACT: *The purpose of this paper is to investigate the multi-modal Maritime risk classification, which has shown a great global attention in recent years. Disruption and uncertainties in shipping companies are the result of random events which lead to drop performance throughout the maritime transportation supply chain and they severely impact international trade. This study provides an overview of multi-modal supply chain management by reviewing 131 articles in the risk management area. This work also provides a great analysis of transportation risks, their impacts and a risk typology on multi-modal maritime supply chains management. In addition, this paper contributes to the current risk management literature by proposing a novel risk typology that permits to determine which risk carriers and shippers involved in multi-modal containers transportation should address first, thereafter this typology could be used to build a decision support tool in order to detect and mitigate risks in real-time.*

KEYWORDS: *Risk, disruption, uncertainty, maritime container transport.*

1 INTRODUCTION

Maritime transportation is the most used transportation mode in international trades. Indeed, it represents 90% of international trades(Wendler-Bosco & Nicholson 2019). World traffic in containerized goods increased by 6.4% in 2018 (*Etude sur les transports maritimes 2018* 2018). This explains that maritime container supply chain becomes more and more dynamic and complex. Maritime container transport is a complex process because several stakeholders are involved, such as, the shipper (the company that sells its products), the buyer (the company or person to whom the products are sold), the carrier (the company which takes care of the organization of the transport from shipper warehouse to the arrival port), the shipping line (the company which deals with the maritime transport of products from departure port to arrival port) Fig 1. In an internal supply chain the shipper and buyer are the same actor.

Multi-modal maritime container transportation is exposed to various hazardous events that affect the supply chain of all the stakeholders involved in the transportation process(Wang, Xu, Peng, Zhou & Jiang 2020). These last years, disruptions due to

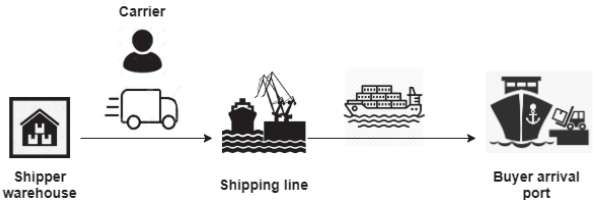


Figure 1 – Maritime stakeholders

maritime supply chain risks have impacted the performances of the companies (Ho, Zheng, Yildiz & Talluri 2015), this is why the management of maritime supply chains receives a great deal of attention in literature. In addition the recent epidemic world crisis, which has caused a disruption in multi-modal transportation, highlights the role of supply chain risk management for several business sectors. Many research works have been published on the identification, classification and assessment of risk factors in containers shipping. For example, (Vilko, Ritala & Hallikas 2019) provided a holistic and systemic view of risk visibility and control in maritime supply chains. (Abdel-Basset, Gunasekaran, Mohamed & Chilamkurti 2019) also proposed a framework for the assessment, management and evaluation of risks in a supply chain. However there is a lack of real-

time detection, quantification and mitigation of risks in multi-modal maritime supply chain in the literature. Real-time risk detection and quantification could help the supply chain decision-makers to be more proactive in risk assessment. These studies provide risk typologies according to dimensions such as external and internal risks or macro and micro risks, based on qualitative and quantitative analysis of supply chain risks. Typologies provided in the literature help the researchers and stakeholders involved in maritime container supply chain identify various risk types with their associated impacts. However, most of the time, they are not really suitable to be used for real-time detection of risks in multi-modal containerized transportation.
This work aims to provide a structured systematic literature review on multi-modal maritime supply chain risk management by identifying risk class and risk typologies proposed. Afterwards, these risk classes are used to propose a novel typology which will be the beginnings for construction of a decision support tool which will be used to detect and mitigate risks in real-time. Two main questions are addressed in this literature review:

1. What is the current state of the research in Risk management of Multi-modal Maritime Supply chain?

2. What are the gaps in the current research that future research should address?

This paper is structured in 5 sections and is based on the existing literature related to maritime supply chains risk management between 2005 and 2020. The second section presents research methods and frameworks used to carry out the systematic literature review. Section three presents an analysis of the set of the previously selected articles and, hence, provides the current state of the art about risk class in supply chain. Based on this state of the art, section four proposes a novel risk typology specifically designed for the real-time detection, quantification of the risks. The use of this typology by multi-modal maritime supply chains managers will finally be discussed in section Five.

2 RESEARCH FRAMEWORK

This section aims to detail the research methodology that was used to carry out the systematic literature review. In order to capture the most important and recent works published in supply chain risk management, within the maritime transport area, three mains steps were executed (Fig 2):

- Articles collection
- Articles selection
- Articles analysis

2.1 Articles collection

This section details the article collection process, which is step 1 in the research framework illustrated in Fig 2. Four keywords: *risk*, *disruption*, *uncertainty* and *maritime container transport* have been identified to shape the request to select the most relevant articles on the scientific databases. As a result, the established request: "risk or disruption or uncertainty and maritime transport" was applied to the most relevant bibliographic databases such as *Science Direct*, *Springer*, *Taylor & Francis*, *Scopus* and *Web of science* and we limited the publication year between 2005 and 2020 in order to capture recent information. In addition, to ensure that all the articles brought up by the first request deal with container transportation, we refined the results with the keyword *container* for each database request. By considering only articles written in English identified in each databases we gathered 350 articles. After this collection, duplicates have been removed (39 articles).

2.2 Articles selection

The aim of this section is to present the articles selection process, which is step 2 in the research framework, in Fig 2. After having gathered the articles, the most relevant were selected to be analyzed. An article is considered relevant when its abstract contains the combination of "risk or disruption or uncertainty and maritime container transport". This permits to exclude works dealing with air transport and those not dealing with risks in maritime container transport. Hence, 149 articles have been removed from the previous collection.
After reading the introductions and conclusions of the remaining articles, 131 articles were finally selected and analyzed. An article is relevant in full reading phase when the article proposed a method to identify and/or assess container transportation risks or proposed a risk typology. This permits to discard all studies proposing risk management frameworks without really specifying risk class (Yang 2010) (Fig 2).

3 Articles analysis

The number of publications each year is indicated in Fig 4. The distribution of articles demonstrates the interest shown for several years in maritime container transport. The number of articles published has grown since 2017, the number of articles published in 2019 is twice the number published in 2018. The aim of this section is to identify different risk typologies, risk classes and their impacts proposed in

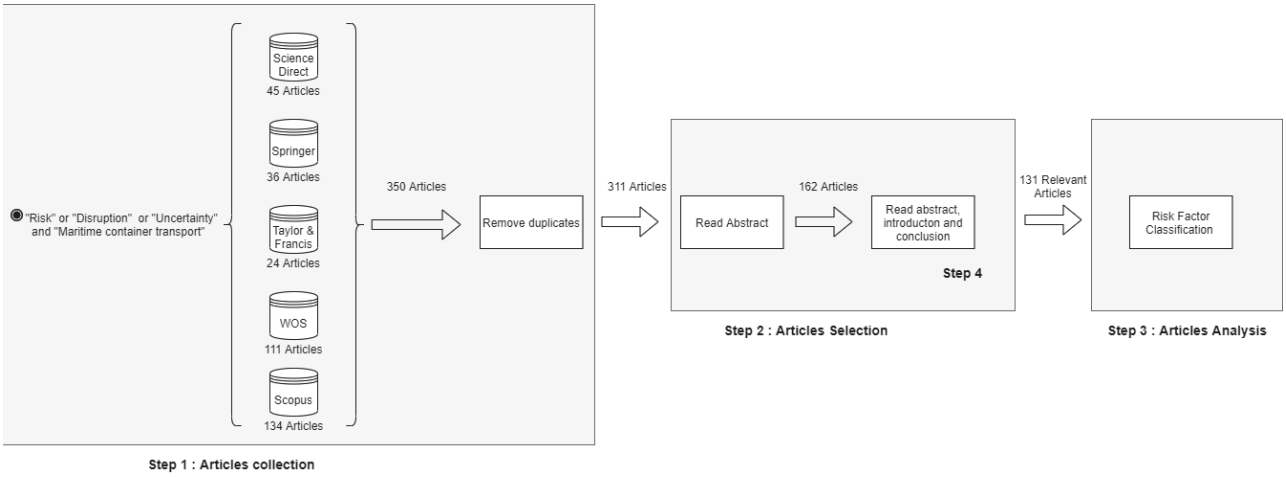


Figure 2 – Research Framework

the literature; it's the step 3 in research framework Fig 2. In addition, a comparison of solutions proposed by each paper with the research question they address (the research contribution in Maritime supply chain management).
Maritime supply chain risk management's aim is to identify and create mitigation techniques in order to avoid risks encountered during shipping. By analysing the 131 articles selected, only ten give a structured typology of risk factor. All the typologies proposed by the different authors can be grouped into three main categories: those who distinguish external and internal risk, those who classified macro and micro risk and those who classified risks occurred following supply chain flow (physical, information and financial flow). These typologies are more detailed in the following paragraphs :

- External and internal risk typology

  On the other hand the authors in (Vilko et al. 2019) (Vilko & Hallikas 2012) (Abdel-Basset et al. 2019) (Li 2014) (Moslemi 2016) (Wan 2018) (Achurra-Gonzalez & al 2019) provided a holistic and systemic view of risk visibility and control in maritime supply chains by proposing two risk types, internal and external risk.

- Macro and Micro risk typology

  The authors in (Ho et al. 2015) reviewed 224 articles between 2003 and 2013 and then proposed two types of risk, macro and micro risk factors. A macro risk is defined as a risk caused by natural disaster (earthquake, weather-relate disasters, etc) and a micro risk (Demand risk, Manufacturing risk, supply risk and infrastructural risk) is defined as an operational risk occurring during transport activities. For analogy, macro risk may be assimilated to external risk and micro risk to internal risk.

- Classification following Supply chain flow

  Some authors classified risks by following the supply chain flow. For example, the authors in (Tang & Nurmaya Musa 2011) investigated the research development in supply chain risk management by reviewing 138 articles between the years of 1995 and the first half of 2008. They identified 3 risk types: material, information and financial flow risk. In the same way, the authors in (Chang, Xu & Song 2016) also proposed classification of risks by following 3 main flows in supply chain (Information, Physical and Payment flow). The authors in (Tsai 2006) works on risk related to information acquisition.

The identified risk classes are assigned to each type of risk. These three typologies provide classification could help maritime supply chain stakeholders identify and quantify risk. However, the proposed typologies do not help determine what risks stakeholders should address first in order to increase the performance and the resilience of maritime container supply chain.



Figure 3 – Risk Management process

3.1 Most relevant source

It is important to note on the figure 4 that among all of the sources brought up by the bibliography research, the journal Maritime Policy / Management has published the most articles 13% between 2005

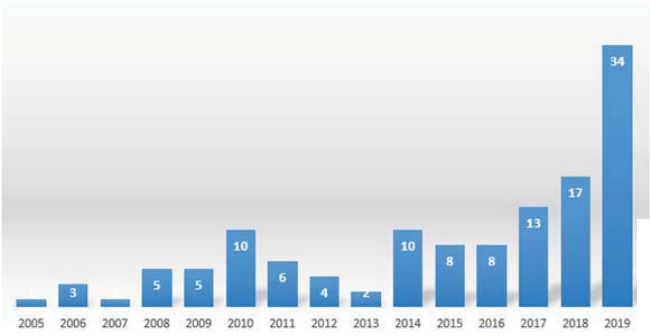


Figure 4 – Article distribution

and 2020 that deal with risk management in the maritime container transport. Maritime Economics / Logistics magazines and Transport Research Part come secondly with 5% of articles each. Theses sources provide articles proposing measures to address the risk classes in maritime transport area.

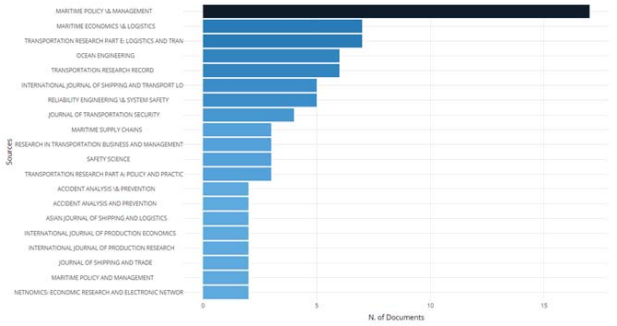


Figure 5 – Most relevant Source

3.2 Risk class identification

(Gourc 2006) define a risk as "the possibility that an event may occur whose occurrence would have impact (positive or negative) on the progress of the activity". A risk is characterized by two dimensions, the probability of occurrence and the severity of potential impacts. A risk class is defined as a family which regroups risks related to specific domain of multi-modal transport supply chain (supply, organization etc). Many studies propose methods to reduce these risks by following risk management framework steps, risk identification, risk evaluation, risk assessment and risk monitoring (see figure 3). Investigation methods like Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) (Alyami, Yang, Riahi, Bonsall & Wang 2019), review of accident statistics(Kumar & Verruso 2008), Bayesian networks (Baksh, Abbassi, Garaniya & Khan 2018) and interviews with maritime and multi-modal transport experts permit to identify risk class. For instance, the authors in (Alyami, Lee, Yang, Riahi, Bonsall & Wang 2014) identify 76 risk sources and hazardous events in container port operations by using an advanced FMEA and different expert's knowledge in port operations. In the same way, the authors in (Yang 2010) and (Yang & Hsu 2018) used a questionnaire survey and structural equation to examine maritime supply chain resilience. The literature review allows us to identify several risk class associated to risk typologies: Supply risk, Demand risk, Business risk, Operational risk, Environmental risk, Organizational risk, Infrastructural risk.

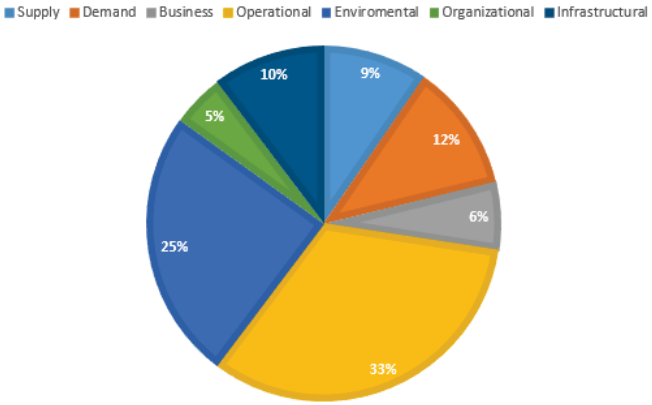


Figure 6 – Risk class distribution

3.2.1 *Supply risk*

Also called logistical risk, the supply chain risks increase the probability to perturb the circulation of products through the supply chain. These risks include lack of equipment or bottlenecks in maritime routes, labor strike etc. For example the authors in (Hossain, Nur, Hosseini, Jaradat, Marufuzzaman & Puryear 2019b) identified supply risk class as the basic factors that could enhance the resilience of the port system in order to quantify the resilience of the port infrastructure by applying a Bayesian network. The authors in (Lam & Bai 2016) proposed supply risk class in external and internal risk classification (Port state inspections).

3.2.2 *Demand risk*

Shipping lines face two types of customer demands: long-term demand ans spot market demand" (Zheng, Li & Song 2017). The spot market demand uncertainty causes a risk-aversion attitude in maritime companies pricing strategies(Xing & Zhong 2017). Demand risk are related to unexpected customer demand. The authors in (Shibasaki, Azuma, Yoshida, Teranishi & Abe 2017) proposed a logit model to deal with these risks. To finish the authors, in (Choi, Beresford, Pettit & Bayusuf 2010) investigated on the aid supply chain operation in normal and extreme condition of Rwanda civil war in order to asses demand risk (demand fluctuation) during emergency movement.

3.2.3 *Business risk*

Also called financial or economical risks "these risks include the stability of a supplier finance or man-

agement, or purchase and sale of supplier companies" (Abdel-Basset et al. 2019). The authors in (Wan, Yan, Zhang, Qu & Yang 2019) developed a model incorporating a fuzzy belief rule approach with Bayesian networks in order to assess business risks. (Drobetz, Schilling & Tegtmeier 2010) analyzed macroeconomic risk factors that drive expected stock returns in container shipping industry. The authors in (Li 2014) addressed the degree of risk of maritime transport nodes in Taiwan and Chinese Strait.

3.2.4 Operational risk

Also called technical or physical plant risks, these risks occur during the operational transport process. Operational risks include congestion, fire, terrorism, piracy, long waiting time , handling, stowage etc. The authors in (Yang, Ng & Wang 2014) introduce a novel fuzzy evidential reasoning approach to analyze operational risk factors (terrorism, hijacking) for port facility security. The authors in (Lam & Bai 2016) and (Lam, Lun & Bell 2019) proposed operational risk factor in external and internal risk classification (Ship collision or sinking, the condition of cargo-handling equipment and problems with document interpretation). These risks are the most dealt in the literature Fig 6. (Nguyen 2020).

3.2.5 Environmental risk

Maritime transportation often face to environmental risks and accidents that cause severe delay and financial lose which affect cargo flow (Achurra-Gonzalez & al 2019). These risks include uncertainty weather, natural disasters(earthquake, cyclone, flood, drought, volcanic eruption, seismic, hurricanes and tropical storms), political conflicts or man-made crises (civil unrest, war, political/tribal disturbance). The authors in (Hossain et al. 2019b) identifies environmental risks in order to use Bayesian network for quantify them. In the same way the authors in (Fan, Wrobel, Montewka, Gil, Wan & Zhang 2020) (Perez Lespier, Long, Shoberg & Corns 2019) and (Gudelj, KrÄum & KrÄum 2008) cited environmental risks when they identify risk class that influence the navigation.

3.2.6 Organizational risk

Also called managerial or planning and control risks, "these risks occur due to inappropriate estimation and planning, which reach ineffective management" (Abdel-Basset et al. 2019). The authors in (Hossain et al. 2019b) and (Wan et al. 2019) identified organizational risks in order to use Bayesian network for quantify them. The authors in (Fabiano, Curro, Reverberi & Pastorino 2010) argued that organization of work and environmental conditions can affect occupational accident frequency in port. In the same way, the authors in (Yang 2011) by following external and internal risk typology have identified risk perception on Chinese and Korean shipping companies, and also demonstrated the impact of organizational risks on shipping company performance.

3.2.7 Infrastructural risk

A failure of an infrastructure in a port or the degradation of a resource can lead to sever disruption in maritime supply chain. Infrastructural risks include information risk (lack of visibility or delay in transmission), lack of transportation mode and port capacity. The authors in (Hossain et al. 2019b) identified infrastructural risks in order to use Bayesian network for quantify them. The authors in (Fan et al. 2020) cited technological risk class when they identify risk factors that influence the navigation. The authors in (Wan et al. 2019) developed a model incorporating a fuzzy belief rule approach with Bayesian networks in order to assess infrastructural risks.

4 Risk taxonomy

The work of identifying and analyzing the typologies and risk classes carried out in section 3 makes it possible to propose a new typology which will be used for the detection of risks in real-time. In this section, the novel risk typology proposed in order to help shippers and carriers better assess risks is based on the risk classes identified in literature. This typology takes up the classification of risk classes according to logistical flows (physical and information flows) and include the context risk type which influences maritime container transportation. The proposed typology also provides a analysis of detectibility of risks and potential impacts during shipment.

4.1 Detectability

We define risk detectability as the possibility for stakeholders involved in maritime supply chain to detect the risk when it occurs. Many authors agreed that supply chain visibility is one the key for risk management (Vilko & Hallikas 2012).

4.2 Impacts

"All risks can be minimized to a manageable level by employing the proper mitigation strategy" (Vilko et al. 2019). Mitigation strategy in risk management framework are used to reduce the risk occurrence probability or the risk severity. The mitigation strategies proposed by authors in the field of supply chain risk management use various quantitative and qualitative methods to reduce risk impact severity. For example the authors in (Abdel-Basset et al. 2019) and (Vilko & Hallikas 2012) propose

Risk class	Risks	Definition
Supply risk	Lack of equipment	Lack of appropriate equipment for container loading or unloading
	Bottlenecks	Bottlenecks in arrival port
	Labor strike	Docker strike could affect transport plan
	Bad handling	Bad handling during container loading
	Lack of human resource	Lack of human resource for container loading or unloading
	Unstable maintenance	Poor maintenance on transportation resources
	Carelessness	Carelessness on container or goods hanling
	Lack of motivation among worforce	Lack of motivation of human resource during container loading or unloading
	Lack of skilled workers	Lack of skilled dockers
Demand risk family	unexpected customer demand	Unexpected variation on customer demand
Business risk	Purchase and sale of supplier companies	Lack of transportation mode provider
	Production cost	Unexpected production cost variation
	Fuel cost	Unexpected Fuel cost variation
	Storage cost	Unexpected Storage cost variation
	Fundig	Lack of finance
	Tax changes	Unexpected Tax cost variation
	Debt ratio changes	Unexpected variation of deb ratio
	Return on investment changes	Incorrect estimate of return on investment
Operational risk	Route deviation	Exit the established route plan regardless of transport mode.
	Congestion	Congestion in port due to strike, or lack of resource (equipment, dock...)
	Fire	Fire in the boat during shipment.
	Terrorism	Use of containers to transport weapons
	Unexpected door opening	Unexpected door opening regardless transport mode.
	Unexpected Temperature variation	Unexpected temperature variation regardless transport mode.
	Unexpected Humidity variation	Unexpected humidity variation regardless transport mode.
	Container/ Goods damage	Damage to container/ Goods during container transit and in port during transshipment
	Container/ Good theft	The container or Goods is stolen by pirates during transport or at the port.
	Container Lost	The container was loaded in the wrong boat or landed in the wrong port.
	Piracy	Theft, hijacking of the container by persons outside the crew
	Long waiting time	Long waiting time in port due to lack of resource of transport mode
	Stowage	Shocks due to stowage
	Ship collision	Container damage due to ship collision
	Condition of cargo handling	Handling at port could damage container or goods
	Explosion	Explosion due to transportation of dangereous goods
	Shocks	Shocks due to bad handling of containers
Environmental risk	Uncertainty weather	Bad weather like thunderstorm could affect transport plan
	Natural disasters (earthquake, cyclone, flood...)	Natural disasters like earthquake could affect route plan
	Political conflicts	Instability in export, import or transshipment country
	Man made crises (civil unrest, war...)	Civil war could affect transport plan
Organizational risk	Problems with document interpretation	Transport condition not respected due to misunderstanding of transport document
	Inappropriate estimation of planning	Inappropriate estimation of planning due to lack of information
Infrastructural risk	Lack of visibility	No visibility of container current position
	Delay in transmission	Asynchronous transmission of information between maritime transport stakeholders.
	Lack of transportation mode	Lack of appropriate transport mode in multi-modal transport
	Port capacity	Congestion due to small port capacity
	Lack of relevant information	Lack of anticipation in physical flow due to lack of relevant information
	Cyber-attack	Attack in information system

Table 1 – Risk class

Risk class	Risk management Process			
	Risk Identification	Risk evaluation	Risk assessment	Risk monitoring
Supply risk	(Hossain et al. 2019b) (Fan et al. 2020) (Lam & Bai 2016) (Ho et al. 2015)	(Li, Chen, Govindan & Jin 2018) (Li, Qi & Lee 2015)	(Mani, Delgado, Hazen & Patel 2017) (Alderson, Funk & Gera 2018) (Li et al. 2018) (Li, Qi & Lee 2015) (Hall & O'Brien 2018) (Hartman & Clott 2015)	
Demand risk	(Zheng et al. 2017) (Lam & Bai 2016)	(Shibasaki et al. 2017) (Wang, Wang, Qu, Liu & Jin 2014) (Zheng, Jin & Hu 2016) (Wang, Meng & Wang 2012) (Yin, Chen & Xiao 2019) (Justice & al 2016) (Alexandridis & al 2018)	(Shibasaki et al. 2017) (Choi et al. 2010) (Wang et al. 2014) (Zheng et al. 2016) (Wang et al. 2012) (Mani et al. 2017) (Lee & Moon 2020) (Jeon & Yeo 2017) (Alexandridis & al 2018)	(Cruz & Marques 2012) (Alexandridis & al 2018)
Businees risk	(Abdel-Basset et al. 2019) (Yang 2011)	(Drobetz et al. 2010) (Li 2014) (Fabiano et al. 2010)	(Wan et al. 2019) (Li 2014) (Wang et al. 2020)	(Cruz & Marques 2012)
Operational risk	(Lam & Bai 2016) (Lam et al. 2019) (Pinto & Talley 2006) (Nguyen 2020) (Alyami et al. 2019) (Wan & Yan 2019) (Baksh et al. 2018) (Gudelj et al. 2008) (Chen, & al. 2019) (Baalisampang & al. 2018) (Lewis, Erera, Nowak & White 2013) (Justice & al 2016) (Kraska & Wilson 2009) (Murphy 2007) a (Endrina & al. 2019) (Mirza & Verdier 2008) (Lu, Chang, Hsu & Metaparti 2010) (Ellis 2010)	(Yang et al. 2014) (Zhao, Yan & Zhang 2017) (Nguyen, Chen, Du & Shi 2019) (Li, He, Sun & Cao 2019) (Celik, Lavasani & Wang 2010) (Park, Lu, Nam & Yeo 2019) (Stavrou, Ventikos & Yang 2018) (Yang & Hsu 2018) (Yuan, Hsieh & Su 2019) (Kumar & Verruso 2008) (Yang, Wang, Bonsall & Fang 2009) (Alyami et al. 2019) (Baksh et al. 2018) (Gudelj et al. 2008) (Mohseni & Thierry 2019) (Chen et al. 2019) (Baalisampang & al. 2018) (Lewis et al. 2013) (Justice & al 2016) (Kraska & Wilson 2009) (Murphy 2007) (Nogue-Alguero 2020) (Fan & Wilson 2012) (Pant, Barker, Grant & Landers 2011) (Talas & Menachof 2014) (Raymond 2006) (Shapiro & al 2018) (Ellis 2010)	(Celik et al. 2010) (Park et al. 2019) (Stavrou et al. 2018) (Kumar & Verruso 2008) (Yang et al. 2009) (Baksh et al. 2018) (Gudelj et al. 2008) (Baalisampang & al. 2018) (Shibasaki et al. 2017) (Saeed, Song & Andersen 2018) (Kelman 2008) (Lewis et al. 2013) (Justice & al 2016) (Murphy 2007) (Li et al. 2018) (Li, Qi & Lee 2015) (Li, Jin & Lu 2015) (Fan & Wilson 2012) (Lu et al. 2010) (Barnes & Oloruntoba 2005) (Behdani & al 2020) (Kontovas & Psaraftis 2011)	(Li, Qi & Lee 2015) (Li, Jin & Lu 2015)
Environmental risk	(Achurra-Gonzalez & al 2019) (Hossain et al. 2019b) (Fan et al. 2020) (Perez Lespier et al. 2019) (Gudelj et al. 2008) (Lam & Bai 2016) (Wan & Yan 2019) (Singh, Soni & Badhotiya 2019) (Pouliasis & al 2018)	(Celik et al. 2010) (Yang & al 2018) (Wang, Kato & Shibasaki 2013) (Li 2014) (Li, Li & Lu 2019)	(Jian, Liu & Lam 2019) (Cao & Lam 2019) (Cheaitou & Cariou 2019) (Na & Shinozuka 2009) (Wu, Zhang & Wan 2019) (Hu, Yuan & Nian 2019) (Gou & Lam 2019) (Liu, Gong & Xiao 2018) (Baksh et al. 2018) (Ryan-Henry & Becker 2020) (Pant et al. 2011) (Calatayud, Mangan & Palacin 2017) (Wu, Wang, Yu & Wu 2019) (Iliopoulou & al. 2018) (Ivey, Rix, Werner & Erera 2010) (Mansouri, Lee & Aluko 2015) (Justice & al 2016)	(Choi et al. 2010)
Organizational risk	(Hossain et al. 2019b) (Wan et al. 2019) (Yang 2011) (Marlow 2010)	(Hossain et al. 2019b) (Wan et al. 2019)		(Yang 2011)
Infrastructural risk	(Hossain et al. 2019b) (Fan et al. 2020)	(Wan & Yan 2019) (Tsai 2006) (Gonzalez-Aregall & Bergqvist 2019) (Fan, Heilig & VoÃ 2015) (Singh et al. 2019) (Li 2014) (Lv, Jin & Hu 2020)	(Wan et al. 2019) (Chang et al. 2016) (Schauer, Polemi & Mouratidis 2019) (Li, Chen, Liao & Shi 2016)	(Cruz & Marques 2012)

Table 2 – Risk classes associated to risk management process

three types of risk impact in multi-modal transport (Time , Finance and Quality). Other authors like (Mohseni & Thierry 2019) question in negative socio-environmental impact of shipping industry. The table 2 presents the work carried out in the context of multi-modal risk management associate with step of risk management process.
This study consider the four types of risk impacts in maritime container transport:

- Delay impact: These impacts are linked to increasing of arrival time and lead time due to risks.
- Financial impact: These impacts are linked to losing of container or goods value and additional costs due to risks.
- Damage impact: These impacts are linked to losing of reputation for carrier and losing of goods quality for shipper due to risks.
- Environmental impact: These impacts are linked to increasing of carbon footprint due to risks.

These impacts have been quantified for shipper and carrier when risks occurs with help of qualitative interviews on maritime claims management experts.

4.3 Risk typology

For the proposed typology, risk classes for shippers and carriers are addressed. It's difficult for this typology to use external and internal or macro and micro proposed typology. Because what is external for the shipper can be internal for the carrier or vice versa. The classification according to supply chain flows has been retained.
The table 3 presents the novel proposed risk taxonomy to help carriers and shippers better manage risks in multi-modal transport supply chain. The first column of this table presents risks selected in the literature and confirmed with experts interviews. The physical flow risk type considers operational risks and supply risks. The information flow risk type considers infrastructural risks, demand risks and organizational risks. The context risk type includes environment risks and business risks Table 3. The second column confirms the ability for shippers (SH) or carriers (CA) to detect risks when it's occurs. The last columns of this table assesses the possible impacts of this risk for carriers (CA) and shippers (SH) involved on the supply chain. For example, a route deviation can influence the arrival time of container, which will probably generate additional costs for the shipper who will receive the container late. In parallel, this route deviation can cause a loss of reputation for the carrier who does not respect the delivery time given the contract and to finish this deviation can increase the carbon footprint for the two stakeholders involve on maritime supply chain due to the run-off from the established route plan.

5 Research implication and discussion

Many studies have been carried out in the field of maritime risk management, showing that the subject has been the object of extensive research aiming at improving the security, performance and resilience in maritime container transportation. Most of the studies focus on assessment of maritime risks by providing methods to reduce delay impact of this risk but just a few of them detailed research in risk types and risk class. In the last decade, risk classes are detailed by only 3 articles and just one of them detailed risk classes in multi-modal maritime supply chain. The authors in (Ho et al. 2015) addresses relevant problems to SCRM using approaches that fall within the AI spectrum. They propose a classification related to external, internal and problem-specific risk. The authors in (Wan 2018) presents an overview of the maritime container supply Chains by providing three levels of risk types of maritime container supply chain. To conclude the authors in (Vilko & Hallikas 2012) provides a holistic and systemic view of risk visibility and control in maritime supply chains by using simulation based on qualitative interview data of stakeholders involved in shipping industry in southern Finland and the Gulf of Finland. (Vilko & Hallikas 2012) show that connecting the delay impact probability distributions to the identified risk event probabilities permit to analyze maritime supply chain resilience. Nevertheless none of the studies have proposed risk typology which can permit to know what risk stakeholders should address first in order to improve their transport performance. In addition these proposed typologies don't permit to build a decision support tool in order to detect and mitigate risk in real-time.

5.1 Research implication

Multi-modal maritime supply chains are dynamic and become more and more complex (Vilko et al. 2019). Maritime Risk class identification is an essential step to provide a list of risks in order to help stakeholders involve in multi-modal supply chain manage them well(Wan 2018). Some studies like (Tang & Nurmaya Musa 2011) (Ho et al. 2015) and (Abdel-Basset et al. 2019) have provided insights into risk management in general that permit supply chain managers to identify relevant risks in order to mitigate severe impacts. But just a few of them really focus on risks categorisation in multi-modal maritime supply chains according to their impacts, which would provide a better view of a management team's ability to control them (Vilko & Hallikas 2012). This

Risks	Det	Impacts			
		Delay	**Financial**	**Quality**	**Environmental**
Physical Flow					
Route deviation		Arrival time(CA, SH)	Extra charge(SH)	Lost of reputation(CA)	Carbon footprint (CA, SH)
Piracy		Lead time(SH)	Goods value(SH) Container value(CA)	Lost of reputation(CA)	X
Unexpected Door opening		X	Goods value(SH)	Lost of reputation(CA) Goods quality(SH)	X
Unexpected Temperature variation		X	Goods value(SH)	Lost of reputation(CA) Goods quality(SH)	X
Unexpected Humidity variation		X	Goods value(SH)	Lost of reputation(CA Goods quality(SH)	X
Shocks		X	Container value(CA) Goods value(SH)	Lost of reputation(CA) Goods quality(SH)	X
Container damage	X	X	Container value(CA) Goods value(SH)	X	X
Good damage	X	Lead time(SH)	Goods value(SH)	Lost of reputation(CA) Goods quality(SH)	X
Container theft/ lost	X	Lead time(SH)	Container value(CA) Goods value(SH)	Lost of reputation And customers(CA)	X
Vehicle theft	X	Lead time(SH)	Vehicle value(CA) and Goods value(SH)	Lost of reputation And customers(CA)	X
Cargoes theft	X	Lead time(SH)	Goods value(SH)	Lost of reputation And customers(CA)	X
Long waiting time	X	Arrival time(CA, SH)	Extra charge(CA)	Lost of reputation(CA) Goods quality(SH)	X
Congestion	X	Arrival time(CA, SH)	Extra charge(CA)	Lost of reputation(CA) Extra cost(SH)	X
Bad Handling	X	X	Container valueCA) Goods value(SH)	Lost of reputation(CA) Goods quality(SH)	X
Information Flow					
Lack of visibility	X	Arrival time(CA)	Extra charge (SH, CA) Goods value(SH)	Lost of reputation And customers(CA)	Carbon footprint (SH, CA)
Lack of anticipation	X	Resource management(CA) Resource management(SH)	Extra charge (SH, CA)	Lost of reputation(CA)	Carbon footprint(CA)
Old technology	X	Data acquisition(CA)	Extra charge(CA, SH)	Lost of reputation(CA)	Carbon footprint(CA)
Lack of knowledge on product characteristics		X	Goods value(SH)	Lost of reputation(CA) Goods quality(SH)	X
Delay in transmission	X	Arrival time(CA) Uncertainty in planning(SH)	Extra charge(SH)	X	Carbon footprint(CA)
Lack of standardization		Insight production(SH)	X	X	Carbon footprint(CA)
Lack of analyze on past flows	X	X	Extra charge(CA)	Lost of reputation(CA)	Carbon footprint(CA)
Context					
Fire		Lead time(CA, SH)	Container value(CA) Goods value(SH)	Lost of reputation(CA) Goods quality(SH)	X
Unstable weather		Arrival time(CA, SH) Lead time(CA, SH)	Extra charge(CA)	Goods quality(SH)	X
Transport Strike	X	Lead time(CA, SH)	Extra charge(CA)	Lost of reputation(CA)	X
Political instability	x	Lead time(CA, SH)	Extra charge(CA) Good value(SH)	X	Carbon footprint(SH)
War	x	Lead time(CA, SH)	Extra charge(CA) Good value(SH)	X	X
Country policy	x	Lead time(CA, SH)	Extra cost Good value(SH)	X	X

Table 3 – Risk typology

research addresses the gap of maritime risks identification and classification by providing risk typology according to supply chain flow, their detectability and their impacts (Delay, Financial, Damage and environmental) in shipper and carrier activities. The results of this study contribute to risk management literature by giving a novel typology of risk in maritime supply chain. Our proposed typology presents relevant risks present in multi-modal maritime supply chain confirmed by a series of stakeholders involve in container multi-modal transportation interviews and a large review of the literature. This novel typology also present how risk events can affect carrier and shipper activities.

5.2 Discussion

The literature review shows that most of the studies in maritime supply chain management and supply chain management in general focus on assessing operational, environmental or demand risk class 6. Almost all of the studies focus on reducing occurrence probability of an hazardous events and the severity of the impacts of risk (Wan 2018). Our study provides an overview in risk identification of supply chain in order to help carrier and shipper involve in multi-modal maritime risk management. First, an analysis of risks typologies and risk classes present in risk management literature is provided, This showed that hazardous events could be classified into seven risks families. Then a selection of most relevant risks according to carrier and shipper was achieved with of help of qualitative interviews. Afterwards, while knowing that the impacts vary according to the actors of the supply chain, a study of these risk family in terms of detectability and potential impact was carried out according related to selected stakeholders involved in the shipping process. Analyzing the detectability and impacts of hazardous events is essential for multi-modal maritime supply chain because it permits to determine what risk events stakeholders can reactively and/or proactively address in order to to allow the supply chain to be more safe and resilient. This study finds its limits in the fact that the proposed impacts are limited only to the carrier and shippers, in addition the study doesn't propose methods to quantify risk events occurrence and their impacts severity on multi-modal container transportation supply chain.

6 CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this paper, we have reviewed recent literature relevant to Multi-modal Maritime Supply chains Risk Management. Risk classes, their impacts, and risk typologies have been investigated. Most of the literature focuses on mitigation on maritime risk affect in supply chain by providing quantitative and qualitative technique and method to avoid severe impacts of maritime accidents and hazardous events. Research shows that risk events in maritime supply chain can be regrouped in seven risk families (supply risk, business risk, demand risk, operational risk, environmental risk, organizational risk and infrastructural risk). All these risk families are mostly time classed in three categories, external or internal, macro or micro typology and following supply chain flow (physical, information and financial flow) and their impacts on transportation supply chain can be be categorized in four different types: delay impact, financial impact, quality impact and the environmental impact. This work indicates a larger number of articles in risk management in maritime transport area.
This study also provides an overview of maritime supply chain risk management by providing a new risk typology more adapted for carrier and shipper involved in maritime transport process. This risk typology indicates detectability and shows potential impacts for shipper and carrier involved in multi-modal maritime supply chain. To overcome the limitation of the current study we will propose in a future study a conceptual framework which integrate container real-time monitoring data and exogenous data, that can be used to build a decision support tools which permit to detect risk event and quantify in real-time risk impacts in multi-modal maritime supply chain. The future work will provide data-sets to be used or correlated to detect each hazardous events identified in proposed typology.

References

Abdel-Basset, M., Gunasekaran, M., Mohamed, M. & Chilamkurti, N. (2019). A framework for risk assessment, management and evaluation: Economic tool for quantifying risks in supply chain, *Future Generation Computer Systems* **90**: 489–502.

Achurra-Gonzalez & al (2019). Evaluation of port disruption impacts in the global liner shipping network, *Journal of Shipping and Trade* **4**(1): 3.

Achurra-Gonzalez, P. E., Novati, M., Foulser-Piggott, R., Graham, D. J., Bowman, G., Bell, M. G. H. & Angeloudis, P. (2019). Modelling the impact of liner shipping network perturbations on container cargo routing: Southeast Asia to Europe application, *Accident Analysis and Prevention* **123**. Place: Oxford Publisher: Pergamon-Elsevier Science Ltd.

Alderson, D. L., Funk, D. & Gera, R. (2018). Analysis of the global maritime transportation system as a layered network, *Journal of Transportation Security* .

Alexandridis & al (2018). Shipping risk management practice revisited: A new portfolio approach, *Transportation Research Part a-Policy and Practice* **110**: 274–290. Place: Oxford Publisher: Pergamon-Elsevier Science Ltd.

Alix, Y., Carluer, F. & Slack, B. (2010). The New Us 100% Container Scanning Law: Impacts on the International Supply Chain, *International Journal of Transport Economics* **37**(1): 53–76. Place: Pisa Publisher: Fabrizio Serra Editore.

Alyami, H., Lee, P. T.-W., Yang, Z., Riahi, R., Bonsall, S. & Wang, J. (2014). An advanced risk analysis approach for container port safety evaluation, *Maritime Policy & Management* **41**(7): 634–650. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Alyami, H., Yang, Z., Riahi, R., Bonsall, S. & Wang, J. (2019). Advanced uncertainty modelling for container port risk analysis, *Accident Analysis and Prevention* **123**: 411–421. Place: Oxford Publisher: Pergamon-Elsevier Science Ltd.

Andersen, K., Andersson, H., Christiansen, M., GrÃ¸nhaug, R. & Sjamsutdinov, A. (2017). Designing a maritime supply chain for distribution of wood pellets: a case study from southern Norway, *Flexible Services and Manufacturing Journal* **29**(3): 572–600.

Baalisampang, T. & al. (2018). Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation, *Ocean Engineering* **158**: 350–366.

Baksh, A.-A., Abbassi, R., Garaniya, V. & Khan, F. (2018). Marine transportation risk assessment using Bayesian Network: Application to Arctic waters, *Ocean Engineering* **159**: 422–436.

Balliauw, M., Meersman, H., Van de Voorde, E. & Vanelslander, T. (2019). Towards improved port capacity investment decisions under uncertainty: a real options approach, *Transport Reviews* **39**(4): 531–552. Place: Abingdon Publisher: Taylor & Francis Ltd.

Barnes, P. & Oloruntoba, R. (2005). Assurance of security in maritime supply chains: Conceptual issues of vulnerability and crisis management, *Journal of International Management* **11**(4): 519–540.

Baryannis, G., Validi, S., Dani, S. & Antoniou, G. (2019). Supply chain risk management and artificial intelligence: state of the art and future research directions, *International Journal of Production Research* **57**(7): 2179–2202.

Behdani & al (2020). Port-hinterland transport and logistics: emerging trends and frontier research, *Maritime Economics & Logistics* **22**(1): 1–25.

Berle, Ã., AsbjÃ¸rnslett, B. E. & Rice, J. B. (2011). Formal Vulnerability Assessment of a maritime transportation system, *Reliability Engineering & System Safety* **96**(6): 696 – 705.

Boulougouris, E., Mizythras, P., Chrysinas, L., Vavourakis, G., Theotokatos, G., Aymelek, M. & Kurt, I. (2019). Developing multidisciplinary blended learning courses for maritime education with cross-European collaboration, *WMU Journal of Maritime Affairs* **18**(2): 319–340.

Buksa, J., Francic, V. & Buksa, T. (2015). Technology-based risk calculation methodology in coastal container liner shipping, *Pomorstvo-Scientific Journal of Maritime Research* **29**(1): 84–89. Place: Rijeka Publisher: Univ Rijeka, Fac Maritime Studies.

Calatayud, A., Mangan, J. & Palacin, R. (2017). Vulnerability of international freight flows to shipping network disruptions: A multiplex network perspective, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **108**: 195–208.

Cao, X. & Lam, J. S. L. (2019). Simulation-based severe weather-induced container terminal economic loss estimation, *Maritime Policy & Management* **46**(1): 92–116. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd WOS:000461804000007.

Carlan, V., Coppens, F., Sys, C., Vanelslander, T. & Gastel, G. V. (2020). Chapter 11 - Blockchain technology as key contributor to the integration of maritime supply chain?, *in* T. Vanelslander & C. Sys (eds), *Maritime Supply Chains*, Elsevier, pp. 229 – 259.

Celik, M., Lavasani, S. & Wang, J. (2010). A risk-based modelling approach to enhance shipping accident investigation, *Safety Science* **48**(1): 18–27.

Chang, C.-H., Xu, J. & Song, D.-P. (2016). Impact of different factors on the risk perceptions of employees in container shipping companies: a case study of Taiwan, *International Journal of Shipping and Transport Logistics* **8**(4): 361–388. Place: Geneva Publisher: Inderscience Enterprises Ltd.

Cheaitou, A. & Cariou, P. (2019). Greening of maritime transportation: a multi-objective optimization approach, *Annals of Operations Research* **273**(1): 501–525.

Chen, C. & al. (2018). Critical Success Factors in Marine Safety Management in Shipping Industry, *Journal of Coastal Research* **83**: 846–850.

Chen, H., Lam, J. S. L. & Liu, N. (2018). Strategic investment in enhancing portâhinterland container transportation network resilience: A network game theory approach, *Transportation Research Part B: Methodological* **111**: 83 – 112.

Chen, J., & al. (2019). Identifying factors influencing total-loss marine accidents in the world: Analysis and evaluation based on ship types and sea regions, *Ocean Engineering* **191**.

Choi, A. K.-Y., Beresford, A. K. C., Pettit, S. J. & Bayusuf, F. (2010). Humanitarian Aid Distribution in East Africa: A Study in Supply Chain Volatility and Fragility, *Supply Chain Forum: An International Journal* **11**(3): 20–31. Publisher: Taylor & Francis.

Clott, C., Hartman, B. & Beidler, B. (2020). Chapter 10 - Sustainable blockchain technology in the maritime shipping industry, *in* T. Vanelslander & C. Sys (eds), *Maritime Supply Chains*, Elsevier, pp. 207 – 228.

Cruz, C. O. & Marques, R. C. (2012). Risk-Sharing in Seaport Terminal Concessions, *Transport Reviews* **32**(4): 455–471. Place: Abingdon Publisher: Taylor & Francis Ltd.

Drobetz, W., Schilling, D. & Tegtmeier, L. (2010). Common risk factors in the returns of shipping stocks, *Maritime Policy & Management* **37**(2): 93–120. Publisher: Routledge.

Elleuch, H., Dafaoui, E., Elmhamedi, A. & Chabchoub, H. (2016). Resilience and Vulnerability in Supply Chain: Literature review, *IFAC-PapersOnLine* **49**(12): 1448 – 1453.

Elleuch, H., Hachicha, W. & Chabchoub, H. (2014). A combined approach for supply chain risk management: description and application to a real hospital pharmaceutical case study, *Journal of Risk Research* **17**(5).

Ellis, J. (2010). Undeclared dangerous goods - Risk implications for maritime transport, *WMU Journal of Maritime Affairs* **9**(1): 5–27.

Endrina & al. (2019). Influence of ship design and operational factors on human performance and evaluation of effects and sensitivity using risk models, *Ocean Engineering* **184**: 143–158.

Etude sur les transports maritimes 2018 (2018).

Fabiano, B., Curro, F., Reverberi, A. P. & Pastorino, R. (2010). Port safety and the container revolution: A statistical study on human factor and occupational accidents over the long period, *Safety Science* **48**(8): 980–990. Place: Amsterdam Publisher: Elsevier.

Faghih-Roohi, S., Xie, M. & Ng, K. (2014). Accident risk assessment in marine transportation via Markov modelling and Markov Chain Monte Carlo simulation, *Ocean Engineering* **91**: 363–370.

Fan, C., Wrobel, K., Montewka, J., Gil, M., Wan, C. & Zhang, D. (2020). A framework to identify factors influencing navigational risk for Maritime Autonomous Surface Ships, *Ocean Engineering* **202**.

Fan, L. & Wilson, W. W. (2012). Impacts of Congestion and Stochastic Variables on the Network for US Container Imports, *Journal of Transport Economics and Policy* **46**: 381–398. Patent Number: 3 Place: Bath Publisher: Univ Bath.

Fan, Y., Heilig, L. & VoÃ, S. (2015). Supply chain risk management in the era of big data, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* **9186**: 283–294.

Figliozzi, M. & Zhang, Z. (2009). A study of transportation disruption causes and costs in containerized maritime transportation, Vol. 1, pp. 55–64.

Gharehgozli, A., Mileski, J. P. & Duru, O. (2017). Heuristic estimation of container stacking and reshuffling operations under the containership delay factor and mega-ship challenge, *Maritime Policy & Management* **44**(3): 373–391. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd WOS:000399591100006.

Gonzalez-Aregall, M. & Bergqvist, R. (2019). The role of dry ports in solving seaport disruptions: A Swedish case study, *Journal of Transport Geography* **80**: UNSP 102499. Place: Oxford Publisher: Elsevier Sci Ltd.

Gou, X. & Lam, J. S. L. (2019). Risk analysis of marine cargoes and major port disruptions, *Maritime Economics & Logistics* **21**(4): 497–523.

Gourc, D. (2006). Vers un modÃ¨le gÃ©nÃ©ral du risque pour le pilotage et la conduite des activitÃ©s de biens et de services: Propositions pour une conduite des projets et une gestion des risques intÃ©grÃ©es, p. 123.

Gudelj, A., KrÄum, M. & KrÄum, P. (2008). The role of information technology in maritime education for hazard avoidance, *International Journal of Emergency Management* **5**(3-4): 219–234.

Hall, P. & O'Brien, T. (2018). Trucking regulation as a critical chain asset in port complexes, *Research in Transportation Business and Management* **26**: 122–127. Place: Amsterdam Publisher: Elsevier Science Bv.

Hartman, B. C. & Clott, C. (2015). Intermodal chassis supply in the US - A Bayesian game model, *Research in Transportation Business and Management* **14**: 66–71. Place: Amsterdam Publisher: Elsevier Science Bv.

Ho, W., Zheng, T., Yildiz, H. & Talluri, S. (2015). Supply chain risk management: a literature review, *International Journal of Production Research* **53**(16): 5031–5069. Publisher: Taylor & Francis.

HOSSAIN, N., Amrani, S., Jaradat, R., Marufuzzaman, M., Buchanan, R., Rinaudo, C. & Hamilton, M. (2020). Modeling and assessing interdependencies between critical infrastructures using Bayesian network: A case study of inland waterway port and surrounding supply chain network, *Reliability Engineering and System Safety* **198**.

Hossain, N., Nur, F., Hosseini, S., Jaradat, R., Marufuzzaman, M. & Puryear, S. (2019a). A Bayesian network based approach for modeling and assessing resilience: A case study of a full service deep water port, *Reliability Engineering and System Safety* **189**: 378–396.

Hossain, N. U. I., Nur, F., Hosseini, S., Jaradat, R., Marufuzzaman, M. & Puryear, S. M. (2019b). A Bayesian network based approach for modeling and assessing resilience: A case study of a full service deep water port, *Reliability Engineering & System Safety* **189**: 378 – 396.

Hu, H., Yuan, J. & Nian, V. (2019). Development of a multi-objective decision-making method to evaluate correlated decarbonization measures under uncertainty â The example of international shipping, *Transport Policy* **82**: 148–157.

Hu, Y., Park, G.-K. & Pham, T. Q. M. (2020). A solving algorithm of navigational collision risk through data analysis of fishing vessel activities, *Journal of Data, Information and Management* **2**(1): 25–37.

Iliopoulou, C. & al. (2018). Energy supply security for the Aegean islands: A routing model with risk and environmental considerations, *Energy Policy* **113**: 608–620.

Ivey, L. M., Rix, G. J., Werner, S. D. & Erera, A. L. (2010). Framework for Earthquake Risk Assessment for Container Ports, *Transportation Research Record* (2166): 116–123. Place: Washington Publisher: Natl Acad Sciences.

Jeon, J. W. & Yeo, G. T. (2017). Study of the Optimal Timing of Container Ship Orders Considering the Uncertain Shipping Environment, *Asian Journal of Shipping and Logistics* **33**(2): 85–93. Place: Amsterdam Publisher: Elsevier Science Bv.

Jian, W., Liu, C. & Lam, J. S. L. (2019). Cyclone risk model and assessment for East Asian container ports, *Ocean & Coastal Management* **178**: 104796.

Johnstone, R. W. (2015). 6 - Implementing Maritime Security, *in* R. W. Johnstone (ed.), *Protecting Transportation*, Butterworth-Heinemann, Boston, pp. 179 – 213.

Justice & al (2016). US container port resilience in a complex and dynamic world, *Maritime Policy & Management* **43**(2): 179–191. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Kelman, J. (2008). Hazards in the maritime transport of bulk materials and containerised products, pp. 496–510. Issue: 154.

Kontovas, C. & Psaraftis, H. N. (2011). Reduction of emissions along the maritime intermodal container chain: operational models and policies, *Maritime Policy & Management* **38**(4): 451–469. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Kotcharin, S. & Maneenop, S. (2020). Geopolitical risk and corporate cash holdings in the shipping industry, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **136**.

Kraska, J. & Wilson, B. (2009). Combating pirates of the Gulf of Aden: The Djibouti Code and the Somali Coast Guard, *Ocean & Coastal Management* **52**(10): 516–520.

Kumar, S. & Verruso, J. (2008). Risk Assessment for the Security of Inbound Containers at US Ports: A Failure, Mode, Effects, and Criticality Analysis Approach, *Transportation Journal* **47**(4): 26–41. Place: Washington Publisher: Amer Soc Transportation Logistics.

Lam, J. S. L. & Bai, X. (2016). A quality function deployment approach to improve maritime supply chain resilience, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **92**: 16 – 27.

Lam, J. S. L., Lun, Y. H. V. & Bell, M. G. H. (2019). Risk management in port and maritime logistics, *Accident Analysis & Prevention* **123**: 397 – 398.

Lee, S. & Moon, I. (2020). Robust empty container repositioning considering foldable containers, *European Journal of Operational Research* **280**(3): 909–925.

Lewis, B. M., Erera, A. L., Nowak, M. A. & White, C. C. (2013). Managing Inventory in Global Supply Chains Facing Port-of-Entry Disruption Risks, *Transportation Science* **47**(2): 162–180. Place: Catonsville Publisher: Informs.

Li, B., Li, J. & Lu, J. (2019). Research on the coupled risk of key nodes in maritime transport based on improved catastrophe theory, *Sustainability (Switzerland)* **11**(17).

Li, C., Qi, X. & Lee, C.-Y. (2015). Disruption Recovery for a Vessel in Liner Shipping, *Transportation Science* **49**(4): 900–921. Place: Catonsville Publisher: Informs.

Li, M. Z., Jin, J. G. & Lu, C. X. (2015). Real-Time Disruption Recovery for Integrated Berth Allocation and Crane Assignment in Container Terminals, *Transportation Research Record* (2479): 49–59. Place: Washington Publisher: Natl Acad Sciences.

Li, N., Chen, G., Govindan, K. & Jin, Z. (2018). Disruption management for truck appointment system at a container terminal: A green initiative, *Transportation Research Part D-Transport and Environment* **61**: 261–273. Patent Number: B Place: Oxford Publisher: Pergamon-Elsevier Science Ltd.

Li, S., Chen, J., Liao, Y. & Shi, Y. (2016). The impact of information sharing and risk pooling on bullwhip effect avoiding in container shipping markets, *International Journal of Shipping and Transport Logistics* **8**(4): 406–424. Place: Geneva Publisher: Inderscience Enterprises Ltd.

Li, T.-S. (2014). Establishing an integrated framework for security capability development in a supply chain, *International Journal of Logistics Research and Applications* **17**(4): 283–303. Publisher: Taylor & Francis.

Li, W., He, M., Sun, Y. & Cao, Q. (2019). A proactive operational risk identification and analysis framework based on the integration of ACAT and FRAM, *Reliability Engineering & System Safety* **186**: 101–109. Place: Oxford Publisher: Elsevier Sci Ltd.

Liu, N., Gong, Z. & Xiao, X. (2018). Disaster prevention and strategic investment for multiple ports in a region: cooperation or not, *Maritime Policy and Management* **45**(5): 585–603.

Lu, C.-S., Chang, C.-C., Hsu, Y.-H. & Metaparti, P. (2010). Introduction to the special issue on maritime security, *Maritime Policy and Management* **37**(7): 663–665.

Luo, M., Shin, S.-H. & Chang, Y.-T. (2017). Duration analysis for recurrent ship accidents, *Maritime Policy & Management* **44**(5): 603–622. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Lv, X., Jin, J. G. & Hu, H. (2020). Berth allocation recovery for container transshipment terminals, *Maritime Policy & Management* . Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd, keywords = models, berth allocation, Container terminal, crane scheduling problem, disruption recovery, heuristics, transshipment.

Mani, V., Delgado, C., Hazen, B. & Patel, P. (2017). Mitigating supply chain risk via sustainability using big data analytics: Evidence from the manufacturing supply chain, *Sustainability (Switzerland)* **9**(4).

Mansouri, S. A., Lee, H. & Aluko, O. (2015). Multi-objective decision support to enhance environmental sustainability in maritime shipping: A review and future directions, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **78**: 3 – 18.

Marlow, P. B. (2010). Maritime security: an update of key issues, *Maritime Policy & Management* **37**(7): 667–676. Publisher: Routledge.

Mirza, D. & Verdier, T. (2008). International trade, security and transnational terrorism: Theory and a survey of empirics, *Journal of Comparative Economics* **36**(2): 179–194.

Mohseni & Thierry (2019). Economic evaluation of alternative technologies to mitigate Sulphur emissions in maritime container transport from both the vessel owner and shipper perspective, *Journal of Shipping and Trade* **4**(1): 15.

Moslemi, A. (2016). Performance improvement in mediterranean operations using risk management analysis : Case study of Containerships Group Ltd. Accepted: 2016-02-16T12:22:33Z.

Murphy, M. N. (2007). Chapter Three: Assessing the Threat, *The Adelphi Papers* **47**(388): 73–88. Publisher: Routledge.

Na, U. J. & Shinozuka, M. (2009). Simulation-based seismic loss estimation of seaport transportation system, *Reliability Engineering & System Safety* **94**(3): 722–731. Place: Oxford Publisher: Elsevier Sci Ltd.

Nguyen, S. (2020). A risk assessment model with systematical uncertainty treatment for container shipping operations, *Maritime Policy & Management* . Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Nguyen, S., Chen, P. S.-L., Du, Y. & Shi, W. (2019). A quantitative risk analysis model with integrated deliberative Delphi platform for container shipping operational risks, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **129**: 203 – 227.

Nogue-Alguero, B. (2020). Growth in the docks: ports, metabolic flows and socio-environmental impacts, *Sustainability Science* **15**(1): 11–30.

Pant, R., Barker, K., Grant, F. H. & Landers, T. L. (2011). Interdependent impacts of inoperability at multi-modal transportation container terminals, *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review* **47**(5): 722–737. Place: Oxford Publisher: Pergamon-Elsevier Science Ltd.

Park, Y., Hong, P. & Li, S. (2016). Free trade agreements and maritime supply chain costs: Competitiveness of Korean firms, *Maritime Economics & Logistics* **18**(1): 3–18.

Park, Y. I., Lu, W., Nam, T. H. & Yeo, G. T. (2019). Terminal Vitalization Strategy through Optimal Route Selection Adopting CFPR Methodology, *Asian Journal of Shipping and Logistics* **35**(1): 41–48. Place: Amsterdam Publisher: Elsevier Science Bv.

Perez Lespier, L., Long, S., Shoberg, T. & Corns, S. (2019). A model for the evaluation of environmental impact indicators for a sustainable maritime transportation systems, *Frontiers of Engineering Management* **6**(3): 368–383.

Pinto, C. A. & Talley, W. K. (2006). The Security Incident Cycle of Ports, *Maritime Economics & Logistics* **8**(3): 267–286.

Pouliasis & al (2018). Shipping equity risk behavior and portfolio management, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **116**: 178–200.

Priadi, A., Benabdelhafid, A. & Tjahjono, T. (2014). Transportation supply chain safety assessment based on Ro-Ro ferry shiphandling difficulty model approach, *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling* **6**(3-4): 395–413.

Pristrom, S., Yang, Z., Wang, J. & Yan, X. (2016). A novel flexible model for piracy and robbery assessment of merchant ship operations, *Reliability Engineering & System Safety* **155**: 196 – 211.

Raymond, C. (2006). Maritime terrorism in Southeast Asia: A risk assessment, *Terrorism and Political Violence* **18**(2): 239–257.

RN, L. C. S. K. M. (2011). Is the Maritime Domain a Security Vulnerability To Be Exploited During London 2012 and Beyond?, *Defence Studies* **11**(4): 698–733. Publisher: Routledge.

Ryan-Henry, J. & Becker, A. (2020). Port stakeholder perceptions of Sandy impacts: a case study of Red Hook, New York, *Maritime Policy & Management* . Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Saeed, N., Song, D.-W. & Andersen, O. (2018). Governance mode for port congestion mitigation: A transaction cost perspective, *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking* **19**(3): 159–178.

Schauer, S., Polemi, N. & Mouratidis, H. (2019). MITIGATE: a dynamic supply chain cyber risk assessment methodology, *Journal of Transportation Security* **12**(1): 1–35.

Sciomachen, A., Acciaro, M. & Liu, M. (2009). Operations research methods in maritime transport and freight logistics, *Maritime Economics & Logistics* **11**(1): 1–6.

Shapiro & al (2018). Trojan horse risks in the maritime transportation systems sector, *Journal of Transportation Security* **11**(3): 65–83.

Shi, W. & Li, K. X. (2017). Themes and tools of maritime transport research during 2000-2014, *Maritime Policy & Management* **44**(2): 151–169. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Shibasaki, R., Azuma, T., Yoshida, T., Teranishi, H. & Abe, M. (2017). Global route choice and its modelling of dry bulk carriers based on vessel movement database: Focusing on the Suez Canal, *Research in Transportation Business and Management* **25**: 51–65. Place: Amsterdam Publisher: Elsevier Science Bv.

Singh, C. S., Soni, G. & Badhotiya, G. K. (2019). Performance indicators for supply chain resilience: review and conceptual framework, *Journal of Industrial Engineering International* **15**(1): 105–117.

Stahlbock, R. & VoÃ, S. (2008). Operations research at container terminals: a literature update, *OR Spectrum* **30**(1): 1–52.

Stavrou, D., Ventikos, N. P. & Yang, Z. L. (2018). Benchmarking container port security risks by applying a FIS methodology, *International Journal of Shipping and Transport Logistics* **10**(4): 377–405. Place: Geneva Publisher: Inderscience Enterprises Ltd.

Sys, C. & Vanelslander, T. (2020). Chapter 12 - Future maritime supply networks: Key issues in and solutions, *in* T. Vanelslander & C. Sys (eds), *Maritime Supply Chains*, Elsevier, pp. 261 – 282.

Talas, R. & Menachof, D. (2014). Using portfolio optimisation to calculate the efficient relationship between maritime port security residual risk and security investment, *International Journal of Shipping and Transport Logistics* **6**(3): 314–338. Place: Geneva Publisher: Inderscience Enterprises Ltd.

Tang, O. & Nurmaya Musa, S. (2011). Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management, *International Journal of Production Economics* **133**(1): 25–34.

Tran, N. K. & Haasis, H.-D. (2014). Empirical analysis of the container liner shipping network on the East-West corridor (1995â2011), *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking* **15**(3): 121–153.

Tsai, C.-L. (2017). The Insurance Behavior Evaluation Process of Workers in the Container Terminal Operation Context: An Example in the Port of Kaohsiung, *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy* **6**: 17–28. Place: Amsterdam Publisher: Elsevier Science Bv.

Tsai, M. C. (2006). Constructing a logistics tracking system for preventing smuggling risk of transit containers, *Transportation Research Part a-Policy and Practice* **40**(6): 526–536. Place: Oxford Publisher: Pergamon-Elsevier Science Ltd.

Vilko, J. P. P. & Hallikas, J. M. (2012). Risk assessment in multimodal supply chains, *International Journal of Production Economics* **140**(2): 586 – 595.

Vilko, J., Ritala, P. & Hallikas, J. (2019). Risk management abilities in multimodal maritime supply chains: Visibility and control perspectives, *Accident Analysis & Prevention* **123**: 469 – 481.

Wan, C. (2018). MODELLING AND SYSTEMATIC ASSESSMENT OF MARITIME CONTAINER SUPPLY CHAIN RISKS, p. 242.

Wan, C. & Yan, X. (2019). Analysis of risk factors influencing the safety of maritime container supply chains, *International Journal of Shipping and Transport Logistics* **11**(6): 476–507. Place: Geneva Publisher: Inderscience Enterprises Ltd.

Wan, C., Yan, X., Zhang, D., Qu, Z. & Yang, Z. (2019). An advanced fuzzy Bayesian-based FMEA approach for assessing maritime supply chain risks, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **125**: 222 – 240.

Wang, S., Wang, T., Qu, X., Liu, Z. & Jin, S. (2014). Liner Ship Fleet Deployment with Uncertain Demand, *Transportation Research Record* (2409): 49–53. Place: Washington Publisher: Natl Acad Sciences.

Wang, T., Meng, Q. & Wang, S. (2012). Robust Optimization Model for Liner Ship Fleet Planning with Container Transshipment and Uncertain Demand, *Transportation Research Record* (2273): 18–28. Place: Washington Publisher: Natl Acad Sciences.

Wang, W., Xu, X., Peng, Y., Zhou, Y. & Jiang, Y. (2020). Integrated scheduling of port-centric supply chain: A special focus on the seaborne uncertainties, *Journal of Cleaner Production* **262**.

Wang, X., Kato, H. & Shibasaki, R. (2013). Risk Perception and Communication in International Maritime Shipping in Japan After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster, *Transportation Research Record* (2330): 87–94. Place: Thousand Oaks Publisher: Sage Publications Inc.

Wendler-Bosco, V. & Nicholson, C. (2019). Port disruption impact on the maritime supply chain: a literature review, *Sustainable and Resilient Infrastructure* **0**(0): 1–17. Publisher: Taylor & Francis.

Wu, D., Wang, N., Yu, A. & Guan, L. (2018). Vulnerability and risk management in the Maritime Silk Road container shipping network, *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica* **73**(6): 1133–1148.

Wu, D., Wang, N., Yu, A. & Wu, N. (2019). Vulnerability analysis of global container shipping liner network based on main channel disruption, *Maritime Policy & Management* **46**(4): 394–409. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Wu, J., Zhang, D. & Wan, C. (2019). Resilience assessment of maritime container shipping networks-A case of the Maritime Silk Road, pp. 252–259.

Xing, J. & Zhong, M. (2017). A reactive container rerouting model for container flow recovery in a hub-and-spoke liner shipping network, *Maritime Policy & Management* **44**(6): 744–760. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Yang, C.-C. & Hsu, W.-L. (2018). Evaluating the impact of security management practices on resilience capability in maritime firmsâa relational perspective, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **110**: 220–233.

Yang, C.-S. (2019). Maritime shipping digitalization: Blockchain-based technology applications, future improvements, and intention to use, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **131**: 108 – 117.

Yang, Y.-C. (2010). Impact of the container security initiative on Taiwan's shipping industry, *Maritime Policy & Management* **37**(7): 699–722. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Yang, Y.-C. (2011). Risk management of Taiwanâs maritime supply chain security, *Safety Science* **49**(3): 382 – 393.

Yang, Z. & al (2018). Risk and cost evaluation of port adaptation measures to climate change impacts, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **61**: 444–458.

Yang, Z., Ng, A. & Wang, J. (2014). A new risk quantification approach in port facility security assessment, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **59**: 72–90.

Yang, Z., Wang, J., Bonsall, S. & Fang, Q. (2009). Use of fuzzy evidential reasoning in maritime security assessment, *Risk Analysis* **29**(1): 95–120.

Yin, H., Chen, Z. & Xiao, Y. (2019). Risk perception affecting the performance of shipping companies: the moderating effect of China and Korea, *Maritime Policy & Management* **46**(3): 295–308. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Young, R. R., Peterson, M., Novak, L., Hayes, M. F. & Tillotson, F. (2014). Limiting the worldwide flow of weapons and their components through established maritime transport, *Journal of Transportation Security* **7**(1): 27–43.

Yuan, C.-Y., Hsieh, C.-H. & Su, D.-T. (2019). Effects of new shipping routes on the operational resilience of container lines: potential impacts of the Arctic Sea Route and the Kra Canal on the Europe-Far East seaborne trades, *Maritime Economics & Logistics* .

Yuen, K. F. & Thai, V. (2017). Barriers to supply chain integration in the maritime logistics industry, *Maritime Economics & Logistics* **19**(3): 551–572.

Zhao, X., Yan, H. & Zhang, J. (2017). A critical review of container security operations, *Maritime Policy & Management* **44**(2): 170–186. Place: Abingdon Publisher: Routledge Journals, Taylor & Francis Ltd.

Zheng, B., Jin, J. G. & Hu, H. (2016). Analysis of Profitability for Container Shipping on Arctic Routes by Navigation Speed and Risk of Disruption, *Transportation Research Record* (2549): 54–63. Place: Thousand Oaks Publisher: Sage Publications Inc.

Zheng, W., Li, B. & Song, D.-P. (2017). Effects of risk-aversion on competing shipping lines' pricing strategies with uncertain demands, *Transportation Research Part B-Methodological* **104**: 337–356. Place: Oxford Publisher: Pergamon-Elsevier Science Ltd.

RESOURCES SCHEDULING IN THE EMERGENCY DEPARTMENT USING SIMULATION IN DISASTER CONDITIONS: CASE OF COVID-19

Ibrahim Cheaitou, Abdessamad Ait El Cadi, Abdelghani Bekrar, David Duvivier

Polytechnic University of Hauts-de-France,
LAMIH UMR CNRS 8201, Valenciennes, France
ibrahim.cheaitou@etu.uphf.fr
Abdessamad.AitElCadi@uphf.fr
Abdelghani.Bekrar@uphf.fr
David.Duvivier@uphf.fr

Anwar Sahili

Al-Zahraa Hospital University Medical Center
Beirut, Lebanon
anwar.sahili@zhumc.org.lb

ABSTRACT: *With the propagation of the Coronavirus (COVID-19), many researchers study the influence of this pandemic on the patient flow at the emergency department (ED). This article proposes a simulation model for the emergency department in the case of COVID-19 period. The model is based on real data. It allows monitoring system performances, like the Length of Stay (LOS), and the percentage of patients that are transferred to another hospital, and it helps managers to face the pandemic. After the validation of the model, we tested studied scenarios depending on the arrival rate and the percentage of patients arriving at the ED with symptoms related to COVID-19. Our contribution is resumed in the evaluation of the preparedness of participation of the studied hospital in the national program in case of an outbreak of Coronavirus (when the rate of arrival is high), so we suggested interventions include beds sharing and adding resources. This leads to minimizing the transfer rate of arrested, critical, and overall cases by 20.06 %, 33.38 %, and 5.98 %, respectively. Besides, the LOS is reduced by 63.43 %. The given results could be presented as recommendations for the managers of the ED to plan the resources in a suitable manner to minimize the transfer of patients in case of outbreaks of this pandemic in the future.*

KEYWORDS: *Simulation, Healthcare systems, Emergency department, Capacity management, COVID-19.*

1 INTRODUCTION

As of March 11, 2020, the world health organization has announced COVID-19 as a pandemic due to the rapid accelerated increase of cases and deaths around the globe, which put a lot of pressure on the national health system (WHO, 2020). In Lebanon, the first confirmed COVID-19 case was registered on February 21, 2020. Figure 1 shows the evolution of infected patients from February 21, 2020, until May 11, 2020, with cumulative 809 cases, (Epidemiological Surveillance Program, 2020).

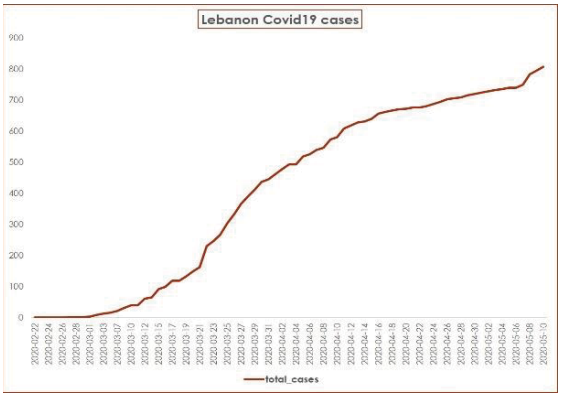


Figure 1: Evolution of COVID-19 cases in Lebanon

An Emergency Department (ED) has to face uncertainty every day; the ED should have sufficient resources to overcome unexpected injuries and diseases (Weng & Wang, 2011). In (Aroua & Abdulnour, 2018), two populations were considered: admitted and non-admitted patients. For admitted patients, the improvement of the hospital admission capacity could be addressed by an increase in the number of beds or the creation of an independent unit for patients under observation and short-stay patients. For non-admitted patients, improving the treatment time for patients under observation is the improvement change with the highest influence. In (Gul & Guneri, 2015a), a comprehensive literature review is carried out to show the ED simulation applications including both normal and disaster conditions. The paper contains studies concerning ED operations published in a global simulation platform-WSC and peer-reviewed journals. Most of the studies are undertaken in the USA, UK, and Canada and include the use of DES (Discrete-Event Simulation) methodology. Many of the studies focus on LOS, resource utilization, the number of patients discharged, and financial analysis as KPIs (Key Performance Indicators). In another study (Gul & Guneri, 2015b) presented a DES model was developed to investigate and analyze an ED under normal conditions and an ED in a disaster scenario which takes into consideration an increased influx of disaster victims-patients. This will allow the early preparedness of emergency departments in terms of physical and human resources. The studied ED is in an earthquake zone in Istanbul. Based on real case study information, the study

aims to suggest a model on the pre-planning of ED resources for disasters.

The intensive care unit (ICU) beds are considered one of the most important resources for critical care COVID-19 patients. So, (Alban et al., 2020) conducted a simple tool to help estimate the patient throughput rate of COVID-19 patients that can be handled by an ICU unit during the COVID-19 pandemic in a specific geographical region. The tool is based on queuing theory and simulation. The ICU time is estimated to be similar to the encountered ICU treatment in Wuhan data for COVID-19 patients and Amsterdam ICU data for other patients (Alban et al., 2020). For example, a 60 ICU bed could have a throughput of 5.5 patients/day if there are 6 COVID-19 patients arrive/day where a proportion of the patients are transferred to another hospital due to bed blocking. A simulation study by (IHME COVID-19 health service utilization forecasting team and Murray, 2020) presents a model to study the impact of COVID-19 on hospital bed-days, ICU-days, ventilator-days, and deaths by US state in the next 4 months after the pandemic starting in the US. At the peak of the pandemic -the second week of April, 2020-, it is estimated that around 64,175 total beds (95% uncertainty interval (UI) 7,977 to 251,059), while for ICU beds, the estimate is 17,380 (95% UI 2,432 to 57,955), and estimation of ventilator need is 19,481 (95% UI 9,767 to 39,674). The peak is found to differ from state to state and ranges from the second week of April through May. For deaths, the prediction is to have around 81,114 deaths with 95% UI (38,242 to 162,106). The rate of deaths is expected to reach under 10 deaths per day between May 31 to June 6. SIR (Susceptible, Infectious, or Recovered) and SIS (Susceptible, Infectious, and Susceptible) epidemic models are used to study the propagation of an epidemic (Hugo Falconet & Antoine Jego, 2016). Guinet, A. (2020) proposed a flow model, which calculates by period the people in different disease stages and under medical treatments and which propagates flow of people between periods. To do that, he used a discrete representation of the SIR model over a horizon of six months.

Jee et al. (2020) described the utility of in situ simulation in identifying system errors and latent safety hazards in response to preparation for the expected COVID-19 surge. They also aim to describe the corrective measures taken to improve its outbreak response locally. This result may inspire others to use this information as foresight in preparing their departments for this outbreak. Wu & McGoogan (2020) Summarize a Report of 72 314 Cases from the Chinese Center for Disease Control and Prevention in mainland China (updated through February 11, 2020). They resumed the key findings from this report and discussed the emerging understanding of and lessons from the COVID-19 epidemic. They showed the distribution of infected cases by age/ spectrum of diseases/ case-fatality rate/ Health care personnel infected. For example, they identified 81% of cases as mild, 14% as moderate, and 5% as critical. We used these distributions of cases in our model. Williamson et al. (2020) worked on behalf of NHS England. They, therefore, set out to deliver a secure and pseudonymized analytics platform inside the data center of a major primary care electronic health records vendor establishing coverage across detailed primary care records for a substantial proportion of all patients in England. In their results, they have quantified a range of clinical risk factors for death from COVID-19, some of which were not previously well characterized, in the largest cohort study conducted by any country to date. Docherty et al. (2020) showed that in study participants, mortality was high, independent risk factors were increasing with age, male sex, and chronic comorbidity, including obesity. This study has shown the importance of pandemic preparedness and the need to maintain readiness to launch research studies in response to outbreaks.

Bordehore et al. (2020) aimed to provide an open model that can be customized to any area/region and by any user, allowing them to evaluate the different behavior of the COVID-19 dynamics under different scenarios. They believe that scenarios comparison can be an effective tool to satisfy the society of the need of a huge and extraordinary effort to reduce new infections and eventually, mortalities. Yuan et al. (2020) aimed to report the real-time effective reproduction numbers (R(t)) and case fatality rates (CFR) in Europe. The used data were obtained mainly from the World Health Organization website, up to March 9, 2020. R(t) were estimated by exponential growth rate (EG) and time-dependent (TD) methods. This study provided important findings on the early outbreak of COVID-19 in Europe.

The current study contributes to the literature of resource planning for COVID-19 pandemic targeting different types of patients severity including arrested (having cardiac attack), critical, and moderate. We use simulation to evaluate the pandemic preparedness and discuss the scenarios of resource scheduling in case of outbreaks. In this perspective, we study the planning to receive and treat patients that are suspected as COVID-19 infected cases in Al-Zahraa Hospital University Medical Center (ZHUMC) at Beirut. We aim to evaluate the preparedness of participation of this hospital in the national program in case of an outbreak of Coronavirus. Our main objective is managing the resource in such a way to minimize or avoid the transfer of infected patients to another hospital without treatment, especially the critical and arrested patients. Another considered performance key is the patient length of stay (LOS).

The remainder of this paper goes as follows. Section 2 presents the proposed workflow for the Corona ED for patients with COVID-19 patients, while section 3 presents the simulation model results for the proposed system and some recommendations for performance improvement. Finally, section 4 presents conclusions.

2 WORKFLOW IN THE ED OF CORONA

Figure 2 shows the planned patient flow for patients arriving at the ED at Al-Zahraa Hospital University Medical Center (ZHUMC) with a focus on the path for patients with COVID-19 symptoms which is moved to the Corona ED unit. The workflow has been identified through multiple interviews with the COVID-19 committee within the ZHUMC which has been formed for preparedness for possible participation in the national program in the "Coronavirus Disease 2019 (COVID-2019) Health Strategic Preparedness and Response Plan" developed by the ministry of public health.

The Corona unit consists of three main sections, namely, the main Corona ED with two isolation rooms (beds) and two ventilators, the Corona intensive care unit (ICU Corona) with three ICU beds with three ventilators, and the Corona regular floor with five beds. Besides, there is a triage room with one bed. Arrival rates to the system are assumed to be the total arrival rate of regular patients (patients with symptoms) and the Corona suspected ones (patients with symptoms).

As the patient arrives, he goes by a triage process; a nurse determines his severity level as in standard ED practice. If the patient is arrested, he would pass the triage and go directly to the Corona ED to have first aid and check if he needs a ventilator. At triage, the patient is classified either mild, moderate, or critical. Different patient classes will have to go through different trajectories in the ED Corona system. If the patient does not show known Covid-19 symptoms, he will be moved to the normal ED, otherwise, he will be routed to the Corona ED. At the Corona ED, mild patients are having the PCR test and are advised to stay isolated at home. They will be informed of the PCR result after that. Around 80% of critical patients will need a ventilator as given from the hospital experts, however, moderate patients usually do not need a ventilator. Critical patients are assumed to have a first aid treatment by a physician and a nurse. It is assumed in the system that the first aid must be performed for patients in need, even though the two isolation beds at the ED unit are busy as this is considered as a lifesaving task. Next, the Corona ED staff will check for available beds patients at the Corona ED either the ICU Corona or Corona regular floor for further treatment. Arrested and critical patients will be assigned to an ICU bed if available, otherwise, they will have the PCR test and wait for the result. If the result is negative, they will be directed to the regular ICU outside the Corona Unit, however, if the result is positive, the patient is transferred to another hospital and would be counted into the number of transferred patients. Moderate patients will be assigned to a Corona regular floor bed, if available. If there is no available bed at the Corona regular floor, an available ICU bed will be used. Otherwise, the moderate corona will also have the PCR test, and depending on the result, they will be admitted to the hospital (regular ICU or regular floor) or transferred to another hospital and would be counted into the number of transferred patients.

3 SIMULATION MODEL AND RESULTS

This section describes the simulation model for the Corona Unit and its process, in addition to the suggested modifications to share beds between the ICU and the regular floor of Corona.

3.1 Simulation model

The simulation model was constructed (using the Rockwell Arena simulator V15) based on a deep understanding of the Corona Unit processes. It mimics the workflow of Figure 2. Figure 3 shows the design of a part of the simulation model (the treatment at ICU Corona). The whole model encompasses six essential processes (Patient arrival, Triage_T0, First Aid, PCR_Test, ICU treatment, Regular Floor Corona treatment). Each process needs a fixed number of resources, in this model we consider two resources as the most important: beds and ventilators. The flow of patients from one process to another is defined using decision components which are implemented respecting the probabilistic model given from collected data from the Ministry of Public Health in Lebanon. The arrival of the patient is simulated using an entity that follows an exponential distribution, which is effective for modeling the arrival process in such a case.

In the case of an outbreak, around 10% of patients are assumed to be symptomatic (Ministry of Public Health in Lebanon). The different probabilities used in the system, arrival rates, and service times have been inferred from the hospital, government sources related to COVID-19, or from hospital experts.
PCR time is assumed to need around 6 hours. PCR positive rate is assumed to be 21.35% hospitalized symptomatic patients as reported in a recent study (Tang et al., 2020). A similar positivity rate has been reported in a recent study that compares the positivity rate of symptomatic hospitalized and community-based patients.

We run the simulation model for 100 days, 32 hours warm-up period, and 12 replicated times. The warm-up period is set for the simulation run to eliminate any bias at the early stages of the process. The realized model was validated by domain experts and by the supervisors of the committee of Corona at ZHUMC. In this paper, we evaluate a model to allocate resources in the corona unit of ZHUMC that includes three parts: ED Corona, ICU Corona, and Regular floor Corona. So, we built our model using statistical distributions to use them as input parameters for the simulation model (see Table 1).

To monitor the performance of the proposed Corona Unit at ZHUMC, we consider, in the simulation model some key performance indicators. These KPIs are the length of stay of the patients (treatment time, diagnostic time, waiting time) and the percentage of blocking beds (or the

rate of transferred patients in each category of patients: arrested, critical and moderate). Note that we do not have a transfer state for those who are mild or without symptoms.

3.2 Scenarios

The current study aims to test studied scenarios to schedule the resources in the Corona Unit at ZHUMC and

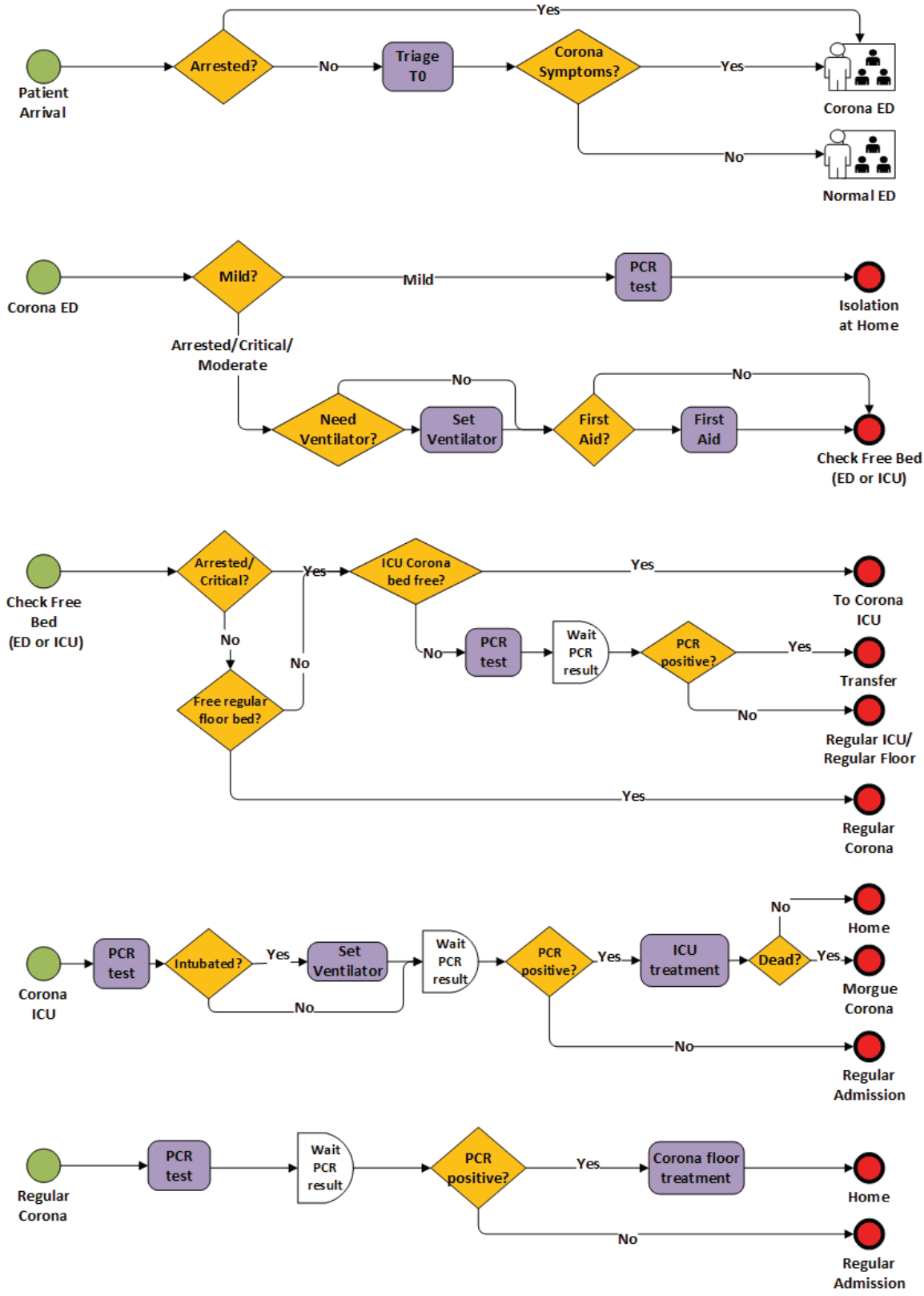


Figure 2: patient flow in the ED system

to be prepared to face the COVID-19. We consider six scenarios depending on the arrival rate of patients (high: exponential(10) and low: exponential(60)) and the percentage of patients that arrive at the ED with Corona symptoms (cough, fever...) with three rates: high (10%), medium (5%) and low (1%). The outbreak scenario is represented by a high arrival rate and a high rate of symptomatic patients (10%).

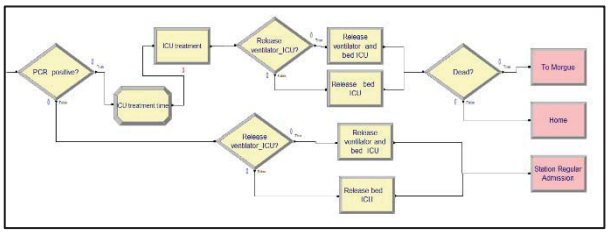


Figure 3: Simulation sub-model of the ICU corona treatment under the Rockwell Arena

Table 1: Simulation parameters

Parameters	Probability Distribution (min)	Description
Patient arrival rate	Exponential (10): high rate Exponential (60): low rate	Time between two patient's arrivals has a mean of a variable.
Triage_T0 time	Triangular(5, 10, 15)	Duration of triage operation: 5, 10, 15 minutes.
First Aid	Triangular(15, 45, 90)	First Aid for critical and arrested patients and 10% of moderate patients.
PCR_Test	480	Time of PCR Test is 6 hours.
ICU treatment	Triangular(20160, 30240, 40320)	ICU Treatment for critical and arrested patients and 10% of moderate patients is Triangular distribution.
Regular Floor Corona treatment	Triangular(10080, 14400, 20160)	Regular Corona Treatment for 90% of moderate patients is Triangular distribution

3.3 Results and recommendations

In this section, we present the results of the above scenarios with a low/high arrival rate of patients and we consider that the percentage of patients who arrive with symptoms in case of an outbreak of corona is about 10% (Ministry of Public Health, Lebanon, 2020).

Table 2 shows the simulation results for the studied scenarios in terms of the average LOS and the transfer rate percentage. It is important to note that the reported transfer rate is calculated relative to the total number of arrived patients in each category, namely: arrested, critical, and moderate. The total transfer rate is calculated relative to the total number of symptomatic patients which include mild patients too. It can be seen that the LOS and transfer rate is increasing when the arrival rate and symptomatic rate increase. It is shown in table 2 that, the rate of transfer of arrested, critical, and moderate patients ranges from 8.22% to 18.94%, from 6.6% to 20.19%, and from 0% to 7.66% as the arrival and symptomatic rate progresses, respectively. For a fixed arrival rate, the total transfer rate is shown to be decreasing with increasing symptoms rate which could be attributed to that large portion of total patients are mild which do not contribute to transfer patients. The LOS is increasing with the rate of symptomatic patient, it passes from 128 min to 180 min in case of low arrival, and from 191 min to 227 min in case of high arrival rate.

Table 2: Simulation results

Arrival rate	Symptomatic rate (%)	LOS (min)	Transfer rate (%)			
			Arrested	Critical	Moderate	Total
Low	1	128	8.22	24.81	0	6.52
	5	151	9	6.6	0	3.63
	10	180	9.16	8.2	0	2.61
High	1	191	17.99	16.98	0	13.91
	5	223	18.12	19	1.38	7.75
	10	227	18.94	20.19	7.66	6.19

The transfer rate is qualified as very high by the hospital management (with the evaluation of Corona committee) and requires a procedure to solve this problem. Besides, the transfer of a critical or arrested patient to another hospital could be dangerous for his life (if we have a disaster case or outbreak). Therefore, it is important to improve the proposed model by some adjustments like the idea of shared beds and the increase of the number of some resources as discussed in the following section.

3.4 Improvements

We modify the model by the use of shared beds (between ICU and Regular Corona Floor) to show the efficiency of this proposal in case of the Outbreak of Corona to

minimize the percentage of transferred patients. After analyzing the report of this model, we show that the waiting time at triage is high (134 min as average). Therefore, we propose another scenario by adding a nurse and a bed in the triage room of this model.

Table 3 presents the improvements obtained by applying the two scenarios. It shows the LOS and transfer rate for the worst scenario named baseline (high arrival rate and high symptomatic rate) and the results of two proposed scenarios. Also, it shows the percentage of change in the performance measures in the two scenarios relative to the tested improvement scenarios.

Table 3 : Results of improvements adjustments

Scenario	LOS in minutes (% of improvements)	Transfer rate (% of improvements)			
		Arrested	Critical	Moderate	Total
Baseline	227	18.94	20.34	7.66	6.19
1st scenario	212 (-6.6)	15.46 (-18.3)	15.5 (-23.7)	16.68 (+117.7)	6.28 (-1.4)
2nd	83 (-63.4)	15.14 (-20.0)	13.55 (-33.3)	15.15 (+97.7)	5.82 (-5.98)

In the first scenario, we share the beds between ICU Corona (three beds) and Regular Corona floor (five beds) to obtain a Corona zone treatment to receive critical, arrested, and moderate patients. In this step, we improved the total transfer rate (from 6.19% in the baseline to 6.28% and 5.82% in the first and the second scenario respectively) and we decreased the average patient LOS from 227 to 212 min. The transfer rate has decreased from 18.94% to 15.46% and from 20.34% to 15.5% for arrested and critical patients, respectively. Notably, the transfer rate for moderate cases has increased from 7.66% to 16.68% due to the shared beds for all patients types.

The second scenario includes the same bed sharing policy as in scenario 1, in addition to adding one more nurse and one bed at the triage process. It is shown that average LOS has dropped from 212 to 83 minutes with a 63.4% reduction. In addition, the rate of transfer from total patients has decreased by 5.98% relative to the baseline scenario. With relative to the first scenario, the transfer rate has decreased from 15.46% to 15.14%, from 15.50% to 13.55%, and from 16.68% to 15.15% for arrested and critical, and moderate patients, respectively.

4 CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

This article presents a simulation study for ED at ZHUMC (Lebanon) in the case of disasters like the pandemic of Corona. After the validation of the simulation model by the experts, the validated simulation is used to test two scenarios of sharing beds and adding resources (nurse and bed in triage process) and their effects on LOS and the percentage of transferred patients.
After the validation of the model, we change the arrival rate and the percentage of symptomatic patients. The tested scenario with a high arrival rate and a 10% symptomatic rate is considered the baseline scenario (worst case or outbreak). This scenario is characterized by excessive waiting time at the triage and high transfer rate of arrested and critical patients.

We show potential improvements, considering sharing beds and adding resources to the triage process. The transfer rate for critical, arrested, and overall cases could be reduced by 20%, 33.3%, and 5.98% respectively. This could have a significant impact on patients' lives. Also, the average LOS could be reduced by 63.4% by improving access to the ED Corona.

We are working on the extension of this work to study the evolution of cases (from moderate to critical for example). Future work would include the use of other important resources like the doctor and the nurse in the treatment process, especially that these treatments need a lot of time (between 7 and 28 days). Besides, we aim to study the propagation algorithm of epidemic viruses like Corona using popular algorithms such as SIR and SIS epidemic models.

5 REFERENCES

Alban, A., S. E. Chick, D. A. Dongelmans, A. P. J. Vlaar, D. Sent, A. F. van der Sluijs, & W. J. Wiersinga (2020). ICU capacity management during the COVID-19 pandemic using a process simulation, Intensive Care Medicine, 2020, 7–9.

Aroua, A., & G. Abdulnour (2018). Optimization of the emergency department in hospitals using simulation and experimental design: Case study, Procedia Manufacturing, 2018, 17, 878–885.

Bordehore, C., Navarro, M., Herrador, Z., & Fonfria, E. S. (2020). Understanding COVID-19 spreading

through simulation modeling and scenarios comparison: preliminary results. MedRxiv, (2020). https://doi.org/10.1101/2020.03.30.20047043

Docherty, A. B., Harrison, E. M., Green, C. A., Hardwick, H. E., Pius, R., Norman, L., Holden, K. A., Read, J. M., Dondelinger, F., Carson, G., Merson, L., Lee, J., Plotkin, D., Sigfrid, L., Halpin, S., Jackson, C., Gamble, C., Horby, P. W., Nguyen-Van-Tam, J. S., Dunning, J., Openshaw, P. JM., Baillie, J. K., & Semple, M. G, (2020). Features of 16,749 hospitalised UK patients with COVID-19 using the ISARIC WHO Clinical Characterisation Protocol. MedRxiv, (2020). 2020.04.23.20076042. https://doi.org/10.1101/2020.04.23.20076042

Epidemiological Surveillance Program. (2020). COVID-19 Coronavirus Lebanon Cases. Retrieved June 13, 2020, from https://www.moph.gov.lb/maps/COVID-19.php

Guinet, A. (2020). A modelling of COVID-19 outbreak with a linear compartmental model To cite this version: HAL Id: hal-02624165.

Gul, M., & A. F. Guneri (2015). A comprehensive review of emergency department simulation applications for normal and disaster conditions, Computers and Industrial Engineering, 2015a, 83, 327–344.

Gul, M., & A. F. Guneri (2015). Simulation modelling of a patient surge in an emergency department under disaster conditions, Croatian Operational Research Review, 2015b, 6:2, 429–443.

Hugo Falconet, & Antoine Jego (2016). Modéliser la propagation d'une épidémie. Interstice. Info. Retrieved from https://www.fondation-lamap.org/fr/page/35700/epidemie-recherche-4-eclairages-scientifiques

IHME COVID-19 health service utilization forecasting team, & Murray, C. J. (2020). Forecasting COVID-19 impact on hospital bed-days, ICU-days, ventilator-days and deaths by US state in the next 4 months. MedRxiv, 114, 2020.03.27.20043752. https://doi.org/10.1101/2020.03.27.20043752

Jee, M., Khamoudes, D., Brennan, A. M., & O'Donnell, J. (2020). COVID-19 Outbreak Response for an Emergency Department Using In Situ Simulation. Cureus. https://doi.org/10.7759/cureus.7876

Ministry of Public Health, L. (2020). Coronavirus Disease 2019 (COVID-2019) Health Strategic Preparedness and Response Plan. Retrieved from https://www.moph.gov.lb/userfiles/files/News/LebnCoV Strategic Response Plan MARCH 2020-converted.pdf

Tang, J. W., Young, S., May, S., Bird, P., Bron, J., Mohamedanif, T., Bradley, C., Patel, D., Holmes, C. W., & Kwok, K. O. (2020). Comparing hospitalised, community and staff COVID-19 infection rates during the early phase of the evolving COVID-19 epidemic. *Journal of Infection*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.05.029

Yuan, J., Li, M., Lv, G., & Lu, Z. K. (2020). Monitoring transmissibility and mortality of COVID-19 in Europe. International Journal of Infectious Diseases, 95, 311–315. https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.03.050

COMPRATIVE STUDY OF TWO CLASSICAL OPTIMIZATION ALGORITHMS SOLVING ECONOMIC DISPATCH PROBLEM

T. DRIDI*, H. JOUINI*
*Faculty of Sciences of Tunis
2092 El Manar, Tunis, Tunisia
tawba_dridi@hotmail.fr, houda.jouini@gmail.com

E. DAFAOUI, A. EL MHAMEDI**, A. MAMI***
**IUT de Montreuil, Université Paris8, France
e.dafaoui@iut.univ-paris8.fr,
a.elmhamedi@iut.univ-paris8.fr,
abdelkader.mami@fst.utm.tn

ABSTRACT: *Solving the Economic Dispatch (ED) problem is an essential task in electrical power management systems. The aim of the ED is to minimize the fuel consumption costs of thermal power plants which could be carried out by finding the optimal generation power for each committed generating unit while providing the load demand and satisfying the operational constraints. This paper presents a comparative study of two classical optimization techniques for solving the conventional ED problem which are Gradient Search and Levenberg-Marquardt Optimization (LMO). The proposed techniques are used to reach the mentioned objective with consideration to real power line transmission loss. They are adapted to IEEE 9-bus 3-unit test system and simulated via MATLAB environment. The results reveal that LMO generates superior and efficient solutions.*

KEYWORDS: *System optimizations, operations search, energy, production management, economic dispatch, Levenberg-Marquardt optimization.*

1 INTRODUCTION

Since the electrical power system of most of the countries mainly consists of thermal plants, the conventional ED is an important task for energy management which deals with power mismatch, fuel cost economy and transmission losses reduction.
The ED problem is solved traditionally using mathematical programming based on optimization techniques such as lambda Iteration method (Dewangan et al., 2015), gradient search (Wood and Wollenberg, 2012), Interior point method (Singhal et al., 2014), Newton's method (Dogra et al., 2014), and Dynamic Programming method (Liang and Glover, 1992).
Classical methods have some advantages such as their optimality that is mathematically proven (Xia and Elaiw, 2010),they can be applied to large scale problems (Bansal, 2005) and they have no problem-specific parameters to specify (Mahdi et al., 2018).
This paper intents to enhance the resolution of a traditional lossy economic active power dispatch via the two conventional optimization techniques; Gradient Search and Levenberg-Marquardt Optimization.
The rest of this paper is organized as follows; **Section 2** introduces the traditional ED mathematical formulation along with the Lagrange function. **Section 3** presents the Gradient Search technique applied for the proposed system. **Section 4** presents the Levenberg-Marquardt Algorithm. **Section 5** elaborates a comparison to discuss the convergence behavior between the Gradient method and LMO. **Section 6** highlights the main conclusion.

2 PROBLEM FORMULATION

The ED is defined as a static constrained mono-objective optimization problem that minimizes the total power cost while satisfying a specific power demand (including the transmission losses) and respecting the power limits of the generators. It is mathematically formulated as follows (Xia and Elaiw, 2010).

2.1 Cost objective function

The main objective of the conventional ED is to minimize the fuel cost to ensure optimal output of generated power while satisfying the operational constraints.

$$FT = \min \sum_{i=1}^{N_g} F_i(Pg_i) \tag{1}$$

where
FT : total fuel cost function
F_i : fuel cost function of the i^{th} generating unit
Ng : number of generating units
Pg_i : real power output of the i^{th} generating unit

$$F_i(Pg_i) = a_i Pg_i^2 + b_i Pg_i + c_i \tag{2}$$

a_i, b_i, c_i : cost coefficients of the i^{th} generating unit

2.2 Problem constraints

The objective cost function (1) is subject to the following equality and inequality constraints.

2.2.1 Power balance constraint

The total generation power must satisfy the demand and the transmission losses.

$$\sum_{i}^{Ng} Pg_i - Pd - Pl = 0 \quad (3)$$

Where
Pd : total power demand in MW
Pl : transmission lines network power losses in MW
The transmission lines network power loss Pl could be calculated by solving the Power Flow problem. The objective of a power flow study is to calculate the voltages (magnitude and angle) for a given load, generation, and network condition. Once voltages are known for all buses, line flows and losses can be calculated (Albadi, 2019).
The total real power losses can be calculated using the total net injected real power at all buses using the following relation (Ciornei and Kyriakides, 2013)

$$Pl = \sum_{k=1}^{Nl} g_k[V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (4)$$

Where
Nl : the number of the transmission lines
g_k : conductance of the k^{th} line that connects bus i to bus j
V_i : the voltage magnitudes at bus i.
δ_i : the voltage angles at bus i.

2.2.2 Real power operating limit constraint

The power generation of each unit should be between its minimum and maximum limits in order to guarantee a stable operation.

$$Pg_i^{\min} \le Pg_i \le Pg_i^{\max} \quad (5)$$

Where $Pg_i^{\min}$ and $Pg_i^{\max}$ are the minimal and maximal power limits of the i^{th} generating unit in MW.

2.3 Lagrange function

The above constrained optimization problem can be converted into an unconstrained problem using the Lagrange function (Wood and Wollenberg, 2012) which is given by:

$$L(Pg_i, \lambda) = FT(Pg_i) + \lambda(Pd - Pl - \sum_{i=1}^{Ng} Pg_i) \quad (6)$$

Where λ is the Lagrangian multiplier.
Necessary conditions for the optimization problem are:

$$\frac{\partial L}{\partial Pg_i} = \frac{d(F_i)}{dPg_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = Pd - Pl - \sum_{i=1}^{Ng} Pg_i = 0 \quad (8)$$

Where $\frac{d(F_i)}{dPg_i}$ is called the incremental cost, it represents the increase of the supplementary cost of a generating unit.

3 GRADIENT SEARCH

The gradient method is based on the construction of a progression x_k that approaches to the minimum. Suppose to start with a random initial value x_0 , and establish the gradient progression using the next relation:

$$x_{k+1} = x_k + \eta f'(x_k) \quad (9)$$

Where:
η is a chosen positive constant value that helps to adjust the speed of the convergence of the algorithm.
k is the number of iterations.
For the ED problem $x = [Pg_i, \lambda]$ and $f'(x) = \nabla L(Pg_i, \lambda)$ then the problem can be solved by finding the solution of the Gradient vector which is expressed as follows:

$$\nabla L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial Pg_1} \\ \frac{\partial L}{\partial Pg_2} \\ . \\ . \\ \frac{\partial L}{\partial Pg_{Ng}} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \quad (10)$$

The initial values of the generated power Pg_i and the Lagrange multiplier λ are calculated with the use of the relations (7) and (8):

$$\lambda = (\sum_{i}^{Ng} \frac{1}{2c_i})^{-1}(Pd + Pl + \sum_{i}^{Ng} \frac{b_i}{2c_i}) \quad (11)$$

$$Pg_i = \frac{1}{2c_i}\left[(\sum_{i}^{Ng} \frac{1}{2c_i})^{-1}(Pd + Pl + \sum_{i}^{Ng} \frac{b_i}{2c_i}) - b_i \right] \quad (12)$$

3.1 Gradient Search Algorithm

Step 1: Read given data cost coefficients (a_i, b_i, c_i), power demand Pd and power limits ($Pg_i^{\min}, Pg_i^{\max}$)

Step 2: Calculate the power losses Pl

Step 3: Calculate the initial values of the Lagrangian multiplier λ^0 and the initial values of the active generated power Pg_i^0

Step 4: Check generation limits for each unit

Set $Pg_i = Pg_i^{\min}$ if $Pg_i \le Pg_i^{\min}$

Set $Pg_i = Pg_i^{\max}$ if $Pg_i \ge Pg_i^{\max}$

Step 5: Calculate the power mismatch

$$\Delta Pg = \sum_{i=1}^{N_g} Pg_i - Pd - Pl \quad (13)$$

Step 7: If $\Delta Pg \le \varepsilon$ (where ε is the convergence criteria, set to $\varepsilon = 0.01$), then stop calculation and move to Step 11 with the obtained optimal value. Otherwise, go to the next step.

Step 8: Calculate the gradient vector ∇L

Step 9: Calculate Pg_i^{k+1} and λ^{k+1} using (9)

$$Pg_i^{k+1} = Pg_i^{k} - \eta \nabla L \quad (14)$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^{k} - \eta \nabla L \quad (15)$$

Where $\eta = 10^{-4}$

Then update Pg_i and λ values.

Step 10: Repeat the procedure from **Step 4**

Step 11: Calculate the cost function with the optimal values of Pg_i and λ

The Gradient Search algorithm is illustrated in the following flowchart:

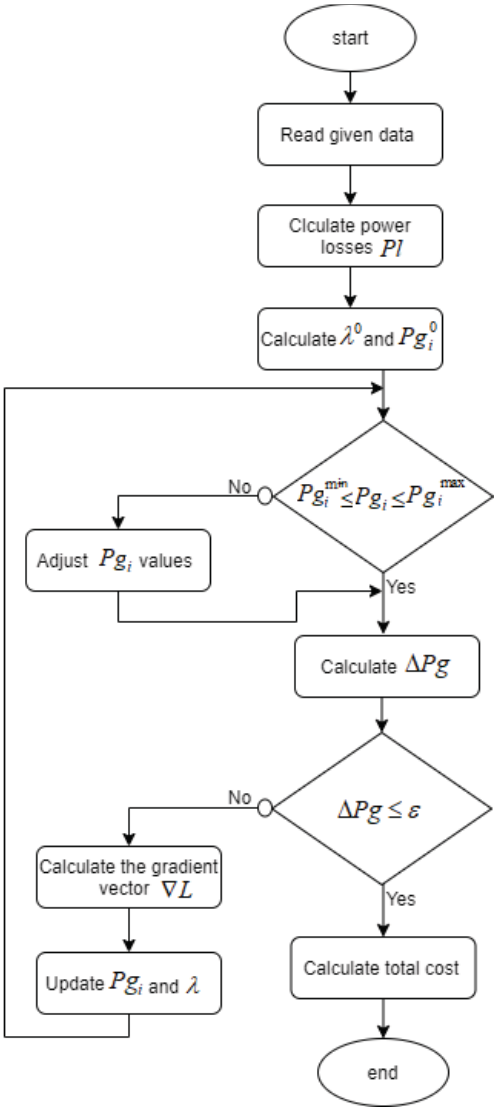


Figure 1: Flowchart of gradient search for the ED

4 LEVENBERG-MARQUARDT OPTIMIZATION

Levenberg-Marquardt Optimization (Marquardt, 1963) is a combination of the directions of the algorithms Gauss-Newton and Gradient descent. It is capable of finding a solution even if it started far from the minimum (Hagan and Menhaj, 1994) . LMO is faster than several numerical techniques such as Lambda iteration method, interior point method (Daniel et al., 2018).

Suppose that we have a function that we aim to minimize $V(x)$ with the respect of the parameters vector x where Newton's update for this vector is as follows (Dogra et al., 2014) :

$$x_{k+1} = x_k - [\nabla^2 V(x)]^{-1} \nabla V(x) \quad (16)$$

Where $\nabla^2 V(x)$ is the Hessian matrix and $\nabla V(x)$ is the gradient.

If we assume that the function $V(x)$ is a sum of squares function:

$$V(x) = \sum_{i=1}^{n} e_i^2(x) \tag{17}$$

$e(x)$ is the difference between the target and the network output then $\nabla^2 V(x)$ and $\nabla V(x)$ can be formulated to:

$$\nabla V(x) = J^T(x)e(x) \tag{18}$$

$$\nabla^2 V(x) = J^T J + S(x) \tag{19}$$

Where $J(x)$ is the Jacobian matrix:

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2(x)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial e_n(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial e_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2(x)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial e_n(x)}{\partial x_n} \\ . & . & & . \\ . & . & \cdots & . \\ . & . & & . \\ \frac{\partial e_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial e_n(x)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial e_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{20}$$

And

$$S(x) = \sum_{i=1}^{n} e_i(x)\nabla^2 e_i(x) \tag{21}$$

The gauss-newton method assumed that $S(x) \simeq 0$,so the update equation becomes:

$$x_{k+1} = x_k - [J^T(x)J(x)]^{-1} J^T(x)e(x) \tag{22}$$

The Levenberg-Marquardt modification to the Gauss-Newton method is:

$$x_{k+1} = x_k - [J^T(x)J(x) + \mu_k I]^{-1} J^T(x)e(x) \tag{23}$$

$$x_{k+1} = x_k - [H(x) + \mu_k]^{-1} \nabla V(x) \tag{24}$$

The Important characteristic of this algorithm is μ_k, generally it's set to ($\mu_k = 0.01$) as a starting point then it is multiplied by 10 whenever a step results an increased $V(x)$. Otherwise, if a step decreases $V(x)$, μ_k is divided by 10.

Notice that when μ is large the algorithm becomes steepest Gradient descent (with step Up), while for small μ the algorithm becomes Gauss-Newton. The Marquardt-Levenberg algorithm can be considered a trust region modification to Gauss-Newton (Battiti, 1992).

For the ED problem $x = [Pg_i, \lambda]$ and $V(x) = L(Pg_i, \lambda)$

4.1 Levenberg-Marquardt Algorithm

Step 1: Read given data cost coefficients (a_i, b_i, c_i), power demand P_d and power limits ($Pg_i^{\min}, Pg_i^{max}$)

Step 2: Calculate the power losses Pl

Step 3: Set the initial values of the Lagrangian multiplier λ^0, the active generated power Pg_i^0 the Levenberg-Marquardt characteristic μ^0

Step 4: Calculate the Langrange function $L(Pg_i, \lambda)$ for each unit

Step 5: Calculate the Jacobian matrix

$$J(Pg_i, \lambda) = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial Pg_1} & \frac{\partial L_1}{\partial Pg_2} & \cdots & \frac{\partial L_1}{\partial Pg_{Ng}} & \frac{\partial L_1}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial L_2}{\partial Pg_1} & \frac{\partial L_2}{\partial Pg_1} & \cdots & \frac{\partial L_2}{\partial Pg_{Ng}} & \frac{\partial L_2}{\partial \lambda} \\ . & . & & . & . \\ . & . & \cdots & . & . \\ . & . & & . & . \\ \frac{\partial L_{Ng}}{\partial Pg_1} & \frac{\partial L_{Ng}}{\partial Pg_1} & \cdots & \frac{\partial L_{Ng}}{\partial Pg_{Ng}} & \frac{\partial L_{Ng}}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \tag{25}$$

Step 6: Calculate the Hessian Matrix

$$H(Pg_i) = J^T(Pg_i)J(Pg_i) \tag{26}$$

Step7: Update the power generation Pg_i and λ following the equation (20)

$$\begin{bmatrix} Pg_{i_{(k+1)}} \\ \lambda_{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Pg_{i_{(k)}} \\ \lambda_{(k)} \end{bmatrix} - \Delta \begin{bmatrix} Pg_i \\ \lambda \end{bmatrix} \tag{27}$$

Step8: Calculate the new value of $L_{k+1}(Pg_i, \lambda)$ for each generating unit

Step9: Update of the characteristic μ

If $L_{k+1} \geq L_k$ set $\mu = \mu * 10$

else if $L_{k+1} \prec L_k$ set $\mu = \frac{\mu}{10}$

Step10: Check generation limits for each unit

Set $Pg_i = Pg_i^{\min}$ if $Pg_i \leq Pg_i^{\min}$

Set $Pg_i = Pg_i^{\max}$ if $Pg_i \geq Pg_i^{\max}$

Step 11: Calculate the power mismatch ΔPg using (13).

Step 12: If $\Delta Pg \leq \varepsilon$ (where ε is the convergence criteria, set to $\varepsilon = 0.01$), then stop the calculation and move to Step 14. Otherwise go to the next step.

Step13: Repeat the procedure from **Step 4**
Step14: Calculate the cost function with the optimal values of Pg_i and λ.

The LMO algorithm is illustrated in the following flowchart:

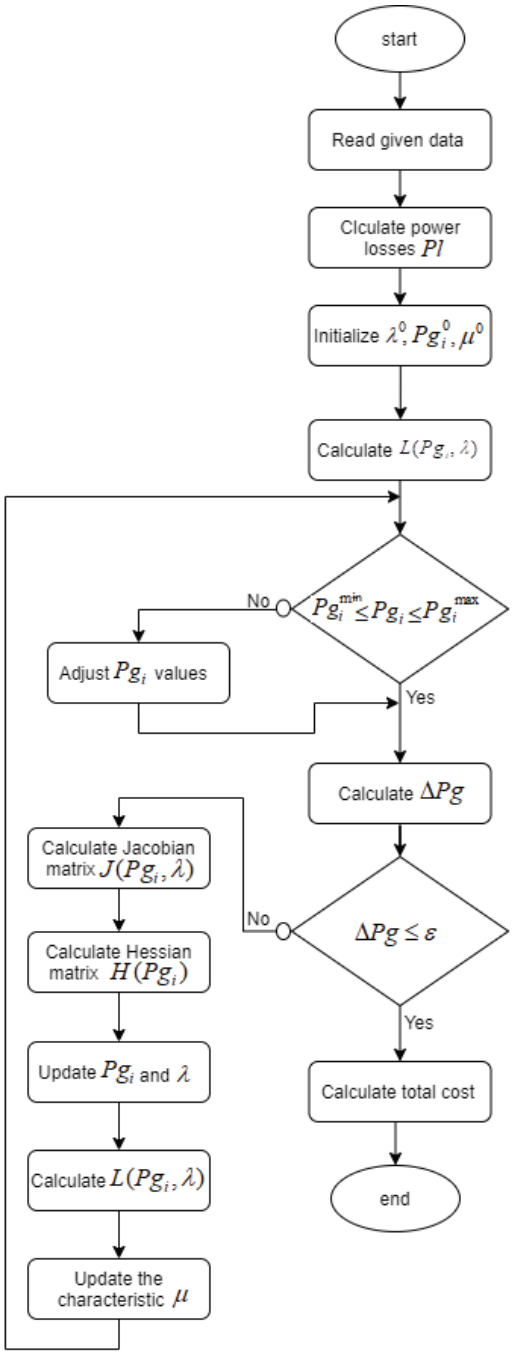


Figure 2: Flowchart of LMO for the ED

5 RESULTS AND DISCUSSIONS

In this part we present the results of applying the Gradient Search and the LMO separately for the static ED using a quadratic cost function.
The network considered is the IEEE.9 Bus system called WSCC 3 machines (also known as P.M Anderson 9 Bus). It consists of 9 buses, 3 generators, 3 power transformers, 6 lines and 3 loads. The load demand to be met by the 3 units is 315MW.
As a first step, the power flow analysis problem was solved using the generators and transmission lines data which is taken from (Anderson and Bose, 1983). Results show that the total active power loss is 4.6410MW, which makes the total active power load set at 319.6410MW.

The cost coefficients and generators limits data are taken from MATPOWER4.1.

Unit	a	b	c	Pg^{min}	Pg^{max}
1	0.11	5	150	10	250
2	0.085	1.2	600	10	300
3	0.1225	1	335	10	270

Table 1: Network generators data

The simulations results using gradient search and LMO separately are illustrated in Table 2:

	Gradient Search	LMO
Pg_1 [MW]	88.0918	88.0192
Pg_2 [MW]	136.0010	136.2601
Pg_3 [MW]	95.5521	95.3642
λ_{opt}	24.2057	73.0997
Iterations number	493	3
Total Cost [$]	5.3284e+03	5.3282e+03

Table 2: results of ED using Gradient search and LMO

We note that LMO provides optimal power generation while it is faster (fewer iterations) and less costly than the Gradient search. However, the Gradient search could give optimal results but it requires more computational time.
As mentioned above the two optimizations techniques were applied for a specific instance of active power load which is 315MW.
In order to test the performance of the proposed method we changed the load at different buses randomly in wide range. For each load the power flow was ran and the power losses was calculated. Some of the simulations results are represented in Table 3.

$Pd = 130$[MW]		
	Gradient Search	LMO
Pg_1 [MW]	31.3098	31.2377
Pg_2 [MW]	62.5172	62.7785
Pg_3 [MW]	44.5649	44.3768
λ_{opt}	11.8082	23.6875
Iterations number	1061	2
Total Cost [$]	2.0445e+03	2.0444e+03

$Pd = 400$[MW]		
	Gradient Search	LMO
Pg_1 [MW]	114.8892	114.8155
Pg_2 [MW]	170.6799	170.9377
Pg_3 [MW]	119.6150	119.4261
λ_{opt}	30.0836	121.0960
Iterations number	400	4
Total Cost [$]	7.6645e+03	7.6642e+03
$Pd = 700$[MW]		
	Gradient Search	LMO
Pg_1 [MW]	213.4636	213.3900
Pg_2 [MW]	229.8868	298.5047
Pg_3 [MW]	208.1306	207.9420
λ_{opt}	51.7401	207.9672
Iterations number	231	4
Total Cost [$]	2.0598e+03	2.0597e+03

Table 3: Test performance of Gradient search and LMO

6 CONCLUSION

We have presented in this paper a comparison between two classical optimization techniques for solving the conventional ED with convex cost function. The proposed techniques were applied to the IEEE.9 bus system with consideration of the transmission lines power loss. LMO has been shown to be more effective than Gradient Search in terms of precision and computation time.
Since the Gradient Search is uncapable of solving the non-convex ED problem (with Valve Point Effects consideration), the LMO can be applied for such a problem and be compared to other classical and heuristic techniques.

REFERENCES

Mohammed Albadi. 2019. Power Flow Analysis. *Computational Models in Engineering*, March.

P. M. Anderson and Anjan Bose. 1983. Stability Simulation Of Wind Turbine Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-102(12):3791–3795*, December.

R. C. Bansal. 2005. Optimization Methods for Electric Power Systems: An Overview. *International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2(1)*, March.

Roberto Battiti. 1992. First- and second-order methods for learning between steepest descent and Newton's method. *Neural Computation, 4(2):141–166*.

Irina Ciornei and Elias Kyriakides. 2013. Recent methodologies and approaches for the economic dispatch of generation in power systems. International *Transactions on Electrical Energy Systems, 23(7):1002–1027*.

Leena Daniel, Krishna Teerath Chaturvedi, and Mohan Lal Kolhe. 2018. Dynamic Economic Load Dispatch using Levenberg Marquardt Algorithm. *Energy Procedia, 144:95–103*, July.

Susheel Kumar Dewangan, Achala Jain, and Dr A. P. Huddar. 2015. A Traditional Approach to Solve Economic Load Dispatch Problem Considering the Generator Constraints.

Rahul Dogra, Nikita Gupta, and Harsha Saroa. 2014. Economic Load Dispatch Problem and Mat lab Programming of Different Methods.

M.T. Hagan and M.B. Menhaj. 1994. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks, 5(6):989–993*, November.

Z.-X. Liang and J.D. Glover. 1992. A zoom feature for a dynamic programming solution to economic dispatch including transmission losses. *IEEE Transactions on Power Systems, 7(2):544–550*, May.

Fahad Parvez Mahdi, Pandian Vasant, Vish Kallimani, Junzo Watada, Patrick Yeoh Siew Fai, and M. Abdullah-Al-Wadud. 2018. A holistic review on optimization strategies for combined economic emission dispatch problem. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81:3006–3020*, January.

Donald W. Marquardt. 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*.

Prateek K. Singhal, R. Naresh, Veena Sharma, and Goutham Kumar N. 2014. Enhanced lambda iteration algorithm for the solution of large-scale economic dispatch problem. *In International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014), pages 1–6*. May.

Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg. 2012. Power Generation, Operation, and Control. *John Wiley & Sons*, November.

X. Xia and A. M. Elaiw. 2010. Optimal dynamic economic dispatch of generation: A review. *Electric Power Systems Research, 80(8):975–986*, August.

COMPLEXITE DE LA CHAINE LOGISTIQUE HOSPITALIERE ET DU COVID-19 : VERS UNE MODELISATION MULTI-AGENTS

Ahmed CHTIOUI, Imane BOUHADDOU, Abla CHAOUNI BENABDELLAH **Asmaa BENGHABRIT**

Laboratoire LM2I, ENSAM, MEKNES, MAROC
ahmed.chtioui79@gmail.com
i.bouhaddou@umi.ac.ma
benabdellah.abla@gmail.com

Laboratoire LMAID, ENSMR, RABAT, MAROC
Laboratoire LM2I, ENSAM, MEKNES, MAROC
a.benghabrit@gmail.com

RESUME : *La crise sanitaire du Covid-19 a frappé de plein fouet toutes les sphères de l'activité humaine. Les secteurs de soins de par le monde, censés contrecarrer la propagation de la maladie et d'en limiter l'étendue sont à bout de souffle suite au manque cruel de moyens et de ressources notamment au pic de la pandémie. Les Chaînes Logistiques Hospitalières (CLH), dont la mission est de mettre à disposition des services de soins ce dont ils ont besoin pour assurer la prise en charge médicale des patients, se sont vues à leurs tours bouleversées par la crise, ce qui mettrait à coup sur le processus de soin en péril. Par ailleurs, la complexité de la CLH conjuguée à la propagation aléatoire et imprévisible du Covid-19 est à même de générer un système très complexe [CLH & Covid-19], et par conséquent compliquer davantage sa compréhension et par la suite sa maîtrise. Dans ce contexte, le présent papier se propose d'abord, de présenter la CLH et de montrer sa complexité, ensuite de prouver via un matching que la propagation du Covid-19 présente des caractéristiques similaires à celles des systèmes complexes, avant de mettre en évidence l'intérêt des Systèmes Multi- Agents (SMA) en tant que paradigme spécifique aux systèmes complexes pour la modélisation du système étudié.*

MOTS-CLES : *Covid-19, Chaîne logistique hospitalière, Complexité, Systèmes complexes, Systèmes Multi-Agents.*

1 INTRODUCTION

Edgar Morin, le père de la pensée complexe a dit « dans l'histoire humaine, c'est presque toujours l'improbable qui est arrivé et pas le probable : attendons-nous à l'inattendu!». En effet, la crise du Covid-19 a pris de court le monde entier, car tout simplement il ne s'y attendait pas. Les systèmes de soins qui sont supposés constituer des remparts contre les crises sanitaires, s'en sortent difficilement. Le nouveau coronavirus a montré plusieurs fragilités et limites de ces systèmes. Même les pays reconnus pour l'efficacité et la performance de leurs secteurs de soins se sont trouvés brusquement dans la tourmente de la pandémie, et se sont rendus compte de leur manque de préparation face à un choc sanitaire d'une telle ampleur.

Dans ce sillage relatif aux effets du Covid-19 sur les composantes des systèmes de santé, la Chaîne Logistique Hospitalière (CLH), considérée comme l'un des leviers de performance de toute structure de soins, n'a pas échappé à l'impact de la crise actuelle et s'en est trouvé grandement affectée, ce qui peut avoir de lourdes conséquences sur le processus de soins (la prise en charge médicale des patients). Ceci est d'autant plus vrai si l'on tient compte du caractère complexe de la CLH.

Par ailleurs, il est à signaler que les recherches menées jusqu'à présent n'arrivent pas à démystifier et à cerner tous les contours relatifs à la propagation de la pandémie du Covid-19, sa nature imprévisible et aléatoire le rend un phénomène fondamentalement complexe. Ainsi, nous avons un système complexe (CLH) qui fait face à un phénomène qui ne manque pas de complexité (propagation du Covid-19), autrement dit à la complexité de la CLH vient s'adjoindre une autre complexité liée au Covid-19, ce qui débouchera sur un système [CLH & Covid-19] très complexe et difficilement gérable (figure 1) :

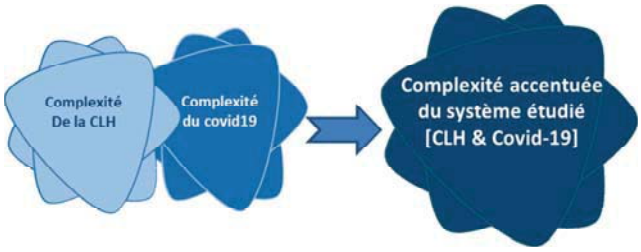


Figure 1 : Complexité du système étudié

Afin de faire face à cette grande complexité et par conséquent mieux comprendre notre système, il convient, après avoir montré la complexité de la CLH et du Covid-19, de justifier l'intérêt de la théorie des systèmes complexes, notamment les Systèmes Multi-Agents (SMA), pour la modélisation de notre système.

Pour ce faire, notre papier sera organisé comme suit : dans la première partie nous allons présenter la CLH, en particulier les processus susceptibles d'être affectés par

la crise. Ensuite, nous allons prouver par un *matching*, que le Covid-19 présente des caractéristiques identiques à celles des systèmes complexes, notamment en termes de sa propagation. Enfin dans la quatrième partie, nous allons montrer l'intérêt des SMA en tant que paradigme spécifique aux systèmes complexes, pour la modélisation du système étudié.

Mais avant d'entrer dans le vif du sujet, nous rappelons que notre système est composé de deux systèmes distincts, à cet effet, et pour pallier toute éventuelle confusion nous l'avons scindé en deux sous-systèmes (figure 2) :

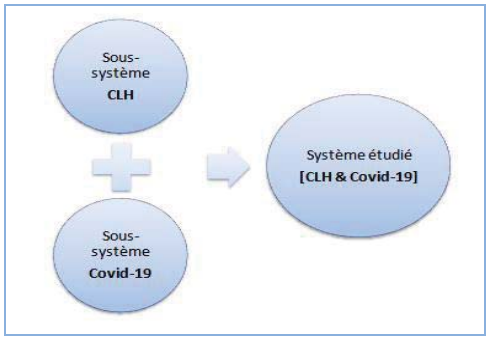


Figure 2 : Système étudié [CLH & Covid-19]

2 COMPLEXITE DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE HOSPITALIÈRE

Dans la littérature, nous trouvons une panoplie de définitions relatives à la Chaîne Logistique Hospitalière (CLH), les auteurs l'ont abordée chacun selon l'aspect ou le domaine qui l'intéresse le plus.
Par exemple Chow et Heaver (Chow et al., 1994) identifient trois grandes activités à la logistique hospitalière :
- L'approvisionnement qui regroupe les achats et la gestion des stocks des différents produits.
- La production qui gère les différentes activités de transformation telles que la lingerie, les cuisines, la stérilisation, etc.
- La distribution qui veille à l'acheminement des différents produits des zones d'entreposage vers les différents points d'utilisation, ou du transport des déchets aux zones d'expédition.

Selon Landry et Beaulieu (Landry et Bealieu, 2000) la logistique hospitalière, se définit comme un ensemble d'activités de conception, de planification et d'exécution permettant l'achat, la gestion des stocks et le réapprovisionnement des biens et services entourant la prestation de services médicaux aux patients.
Pour les processus conception et planification, Di Martinelly et al. (2005) retiennent le modèle suivant :
- Au niveau de la conception, la logistique hospitalière peut intervenir pour la structuration des ressources principales (plateaux techniques, imagerie,…) et pour l'implantation.
- Au niveau de la planification, la logistique hospitalière contribue à la planification du besoin des ressources (personnel soignant, équipement médical, etc.), la planification et l'ordonnancement des activités de soins et la réorganisation en fonction des aléas.

Finalement, pour Sampieri et al. (Sampieri, 2000) la logistique hospitalière est "la technologie de la maîtrise des flux physiques et de la trajectoire des patients par les flux d'information".
Nous nous contentons de ces quatre définitions dans la mesure où elles couvrent pratiquement l'ensemble des processus logistiques dans un hôpital, en particulier ceux susceptibles d'être affectés par la crise sanitaire actuelle (Covid-19). Il s'agit notamment des processus : conception, planification, approvisionnement, production et distribution. En plus des cinq processus, nous nous intéressons aussi aux flux physiques et les flux informationnels qui y sont associés.
Par ailleurs, la CLH est un système complexe à plus d'un titre, « diverses sources impliquent la complexité des chaînes logistiques. Le flux de matières et d'informations représentent les principaux facteurs de complexité le long de la chaîne logistique en raison de plusieurs facteurs tels que la diversité, l'incertitude, la variabilité et l'interdépendance, etc. » (Chaouni Benabdellah et al, 2017. « En se basant sur l'ingénierie de système caractérisé par la multidisciplinarité, la coordination des disciplines et les collaborations des acteurs, ceci nous amène à considérer la complexité de la chaîne logistique comme une complexité de système » (Chaouni Benabdellah et al, 2017). En effet, aux fins d'analogie entre la chaîne logistique globale et la CLH, nous pouvons dire que la diversité des processus logistiques en milieu hospitalier (multidisciplinarité) et leurs interactions incessantes à travers des flux physiques et d'information (coordination et collaboration), conjugués à un environnement hospitalier aussi mouvant que complexe et à l'incertitude de l'activité médicale, font de la CLH un système complexe de premier plan. Les auteurs dans (Chaouni Benabdellah et al, 2019) ont pris le soin de montrer la complexité de la chaîne logistique globale en reproduisant les principales caractéristiques d'un système complexe.
.

3 COMPLEXITE DE LA PROPAGATION DU COVID-19

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) « les coronavirus forment une vaste famille de virus qui peuvent être pathogènes chez l'homme et chez l'animal. On sait que, chez l'être humain, plusieurs coronavirus peuvent entraîner des infections respiratoires dont les manifestations vont du simple rhume à des maladies plus graves comme le syndrome respiratoire du Moyen-Orient (MERS) et le syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS). Le dernier coronavirus (SARS-COV-2) qui a été découvert est responsable de la maladie à coronavirus 2019 (COVID-19)».
La gravité du Covid-19 tient en grande partie à son caractère aussi aléatoire qu'imprévisible, ainsi qu'à la vitesse de sa diffusion (forte contagion). Pour pouvoir comprendre les mécanismes de sa propagation, il

convient de le considérer comme un système complexe, autrement dit, nous allons essayer dans cette section de montrer que les caractéristiques comportementales du Covid-19 notamment en termes de sa diffusion, ne sont pas loin pour ne pas dire similaires aux propriétés des systèmes complexes.

Pour ce faire, il serait judicieux de s'arrêter de prime abord, ne serait-ce que brièvement sur les notions de la complexité et des systèmes complexes.

Pour Edgar Morin, la pensée complexe est la meilleure voie pour comprendre le monde dans sa diversité, d'après lui la complexité peut être reconnue comme étant « l'incertitude au sein de systèmes richement organisés » (Morin, 2005), (Morin, 2007).

Par ailleurs, un système complexe est défini comme étant un système qui se compose d'un grand nombre d'entités hétérogènes et des interactions créant une structure collective et une organisation (Landyman et al. 2013). Ces interactions et interdépendances sont difficiles à décrire, comprendre, prévoir, gérer, développer et/ou à changer (Leverson, 2004 ; Sheard, 2006).

Plus récemment, les auteurs dans (A.Benabdellah et al., 2020) définissent un système complexe comme étant un ensemble de composantes qui peuvent être homogènes ou hétérogènes qui interagissent dynamiquement de façon non linéaire avec une sensibilité aux conditions initiales. Il peut survenir un comportement qui n'est ni complétement aléatoires ni complétement réguliers à plusieurs niveaux et échelles avec des propriétés nouvelles que l'on ne trouve dans aucune des composantes prise individuellement. Ceci dit qu'un petit changement en une composante peut avoir de lourdes conséquences sur le comportement du système dans son ensemble.

S'il n'y a pas dans la littérature une définition exhaustive des systèmes complexes, il y a par contre un compromis autour des propriétés les caractérisant. A ce titre, (Weaver, 1948), (Simon, 1962) et (A. Benabdellah et al., 2020) dans leurs définitions font états des notions suivantes :

- ✓ Le système est composé d'agents en interaction ;
- ✓ Leur comportement émergent ne résulte pas de l'existence d'un contrôleur central ;
- ✓ Le système peut montrer un comportement imprévisible ou conduire à une explosion incontrôlée ;
- ✓ Un petit changement dans les causes peut impliquer des effets dramatiques.

Donc, après avoir eu une idée sur les propriétés des systèmes complexes, focalisons-nous à présent sur la manière avec laquelle le Covid-19 se propage, qu'il s'agisse des modes de transmission du virus ou bien de la conduite des individus composant notre sous-système Covid-19 : [personnes saines, personne contaminées, personnes potentiellement contaminées, porteurs sains (forme asymptomatique de la maladie)], pour voir dans quelle mesure elle présente des similitudes avec les propriétés précitées.

Pour l'OMS « La maladie se propage principalement par les gouttelettes respiratoires expulsées par les personnes qui toussent. Le risque de contracter la COVID-19 au contact d'une personne qui ne présente aucun symptôme est très faible. Cependant, beaucoup de personnes atteintes ne présentent que des symptômes discrets. C'est particulièrement vrai aux premiers stades de la maladie. Il est donc possible de contracter le COVID-19 au contact d'une personne qui n'a, par exemple, qu'une toux légère mais qui ne se sent pas malade. L'OMS examine les travaux de recherche en cours sur le délai de transmission du COVID-19 et elle continuera à communiquer des résultats actualisés »

Aussi, nous considérons que la conduite ou le comportement des éléments constituant notre système pourraient avoir une incidence conséquente sur la propagation de la maladie.

Donc pour établir une sorte d'analogie, nous avons essayé, malgré l'insuffisance des données à l'heure où nous écrivons ce papier, du fait que les recherches sont à pieds d'œuvre pour appréhender les contours et comprendre les mécanismes de diffusion de la maladie, de prouver qu'il s'agit d'un système complexe en établissant un *matching* entre les propriétés des systèmes complexes et les propriétés du sous-système Covid-19, en s'inspirant de la démarche des auteurs dans (Chaouni Benabdellah et al, 2018). Le tableau suivant résume les conclusions du *matching*.

Propriétés des systèmes complexes	**Description**	**Propriétés du sous-système Covid-19**
Hétérogénéité Interaction Connectivité	Un système complexe est défini comme étant un système qui se compose d'un grand nombre d'entités hétérogènes et des interactions créant une structure collective et une organisation (Landyman et al. 2013). Une mesure ou une décision prise par une partie à l'intérieur d'un système influencera toutes les pièces connexes mais pas de manière uniforme (Zwinrn, 2006).	Le sous-système étudié est composé d'éléments hétérogènes (personnes saines, personne contaminées, personnes potentiellement contaminées, porteurs sains) en interaction entre eux et avec leur environnement. Le comportement de chaque élément impactera les autres éléments mais pas de manière uniforme (ça dépend de leur conduite : mesures de protection, gestes barrières, distanciation sociale…).

Propriétés des systèmes complexes	**Description**	**Propriétés du système étudié**
Emergence	Elle se réfère à l'apparition inattendue des configurations spatiales et temporelles dans la dynamique et de la structure du système (Parrot, 2002).	En effet, eu égard à l'hétérogénéité et l'interaction entre les éléments du sous-système, et en tenant compte du comportement de chacun d'eux, de l'observation des gestes barrières etc., il n'est pas évident de prédire la configuration ou l'état du sous-système dans le temps et dans l'espace (Ex : à chaque fois le nombre de cas positifs surprend, des foyers de contamination sont détectés…).
Non linéarité	Les relations entre les entités du système ne peuvent pas être exprimées par un facteur de proportionnalité simple. L'évolution du système a entrainé une forte sensibilité aux conditions initiales : une légère perturbation dans l'état initial du système peut diverger en dehors de son chemin habituel (Zwinrn, 2006).	Effectivement nous somme devant un phénomène très aléatoire, loin de la linéarité. Aussi, l'évolution de notre système reste tributaire des conditions initiales (nombre de cas enregistré initialement, prise de conscience précoce de la gravité de la maladie et de sa forte contagion, mesures prises pour endiguer la pandémie…).
imprévisibilité	La raison pour laquelle l'évolution ne peut pas être prédite ou contrôlée comme il aurait aimé la science déterministe traditionnelle est la nature imprévisible des systèmes complexes (Parrot, 2002). Généralement la complexité suggère une forte contrainte d'imprévisibilité de la dynamique ou d'évolution du système considéré (Donnadieu and Karsky, 2004)	Notre sous-système est fortement imprévisible. On ne peut pas prédire ni contrôler son évolution dans la mesure où plusieurs paramètres et variables y interviennent (trajet de l'individu infecté, personnes contactées, porteurs sains, mesures de protection prises et gestes barrières, conscience de la population, fréquence des tests de dépistage…). A présent, on ne peut pas réduire l'imprévisibilité tant qu'on n'a pas une connaissance parfaite du sous-système.
Coévolution	Avec la coévolution, les éléments d'un système peuvent changer en fonction de leurs interactions entre eux et avec l'environnement. En outre, les modèles de comportement peuvent changer au fil du temps (Chan, 2001).	En effet, l'état de notre sous-système va forcément changer (contamination, guérison, décès…), en fonction des interactions de ses éléments et des paramètres cités auparavant. Aussi les modèles de comportement du sous-système pourraient évoluer avec le temps parallèlement à l'évolution de la conduite de ses éléments (mesures de protection, confinement…).

Tableau 1 : Analogie entre les propriétés des systèmes complexes et celles du sous-système Covid-19.

Donc, à l'issue de cette analyse comparative, l'on peut déduire que le comportement de notre sous-système, que nous estimons décisif dans la propagation de la maladie, s'apparente largement aux propriétés d'un système complexe, d'où l'intérêt de sa modélisation par les paradigmes spécifiques aux systèmes complexes. De surcroît, nombre de questions susceptibles d'agir sur la propagation de la maladie demeurent en suspens et nécessitent des réponses de la part de scientifiques mobilisés pour démystifier ce phénomène épidémiologique, genre : les malades guéris sont-ils immunisés ? Le covid-19 se transmet-il par voie aérienne (le virus reste-il longtemps dans l'air) ? Le virus est-il sensible aux conditions climatiques (météo-sensible)? etc. Ce qui accroît davantage sa complexité.

4 INTERET DES SYSTEMES MULTI-AGENTS POUR LA MODELISATION DU SYSTEME ETUDIE.

L'étude empirique que nous avons menée a montré que la crise sanitaire provoquée par le Covid-19 a considérablement impacté la CLH à bien des égards. A ce sujet, si le processus approvisionnement reste de loin le maillon le plus affecté de la chaîne, suite à l'effet coup de fouet résultant de l'énorme perturbation constatée au niveau de la chaîne d'approvisionnement mondiale, et traduit sur le terrain par la pénurie voire la rupture de stocks de certains produits pharmaceutiques et équipements médicotechniques cruciaux dans la prise en charge des patients atteints de la maladie, les autres processus logistiques n'ont pas été épargnés par la pandémie, notamment les processus stérilisation, lingerie, restauration et gestion des déchets médicaux, dans la mesure où ils peuvent être non seulement impactés mais également des vecteurs de diffusion du virus s'ils ne sont pas correctement maitrisés, ce qui

justifie l'intérêt de modéliser le système [CLH & Covid-19].

La modélisation est un processus de représentation qui permet d'obtenir une image approchée du système réel suite à une phase d'abstraction. Ce processus facilite l'étude et la compréhension des systèmes (Labarth, 2006). De plus la modélisation réduit la réalité en vue d'une certaine finalité (communiquer, piloter, former, dupliquer), cette réduction permet de se focaliser sur l'essentiel et offre une représentation simplifiée et intelligible de la réalité. La connaissance du modèle permettra ainsi de réagir sur la réalité (Thiault, 2007). Par ailleurs, les chaînes logistiques hospitalières se caractérisent par une forte incertitude en matière d'approvisionnement, de la demande et du processus de soins, des risques importants et un contexte à fortes perturbations. Dans ce sens, la modélisation et la simulation s'imposent pour pourvoir étudier les dangers et risques qui peuvent survenir et perturber la bonne marche de la chaine logistique (Khatrouch, 2010). A cet effet, nous considérons que la modélisation constitue dans notre cas une voie sûre pour comprendre au mieux notre système afin de le maîtriser. Nous rappelons ici que notre système est très complexe, les interactions de ces éléments et les comportements qui en émergent nous imposent d'opter pour les modèles de simulation au détriment des modèles analytiques. A ce sujet, Les principales approches (paradigmes) de la modélisation par simulation sont : Dynamique des systèmes (DS), systèmes dynamiques (SD), événement discret (ED) et simulation par agents (SMA). En examinant la littérature, nous pouvons voir que les chercheurs de systèmes complexes préfèrent souvent utiliser des approches de modélisation basées sur l'agent (ou individuelles), la modélisation et la simulation de systèmes complexes (W. Aslaksen, 2009). Dans cette optique, les caractéristiques des SMA semblent être particulièrement adaptées pour la représentation et la simulation des systèmes industriels dynamiques. En effet, il existe une forte analogie entre les caractéristiques architecturales et les pratiques organisationnelles des SMA et de la chaîne logistique. Les deux systèmes sont considérés comme un réseau d'entités et d'acteurs qui interagissent au sein d'une organisation afin d'atteindre un objectif en commun (J.Tounsi, 2009). Pour illustrer le bien fondé de notre idée, nous présentons dans le tableau 2 une comparaison entre les approches de modélisation par simulation établie par les auteurs dans (Chaouni Benabdellah et al, 2016), basée sur les caractéristiques clés qui définissent la complexité d'un système et que nous avons détaillées le long de la deuxième partie.

Modèle	**Caractéristiques de la complexité**	**Avantages**	**Inconvénients**
DS	-Non linéarité -Hiérarchie -Ouvert -Dynamique	-Objets passifs. -Espace implicite.	-Incapacité de capturer les effets spatiaux.
SD	-Non linéarité -Hiérarchie -Ouvert -Dynamique -Paradoxe	-Analyse globale. -Espace implicite. -Niveau élevé d'interactions.	-Difficulté de déterminer quelles parties du problème doivent être modélisées. -Difficulté d'obtenir des données agrégées exactes.
SMA	-Non linéarité -Dynamique -Contrôle distribué -Adaptation -Ouvert -Paradoxe -Connectivité -Hétérogénéité -Emergence (micro)	- Hétérogénéité des agents. -Interactions variées. -Contrôle distribué. -Niveau local.	-La rationalité impliquée par les modèles classiques (optimalité) n'est pas atteignable. -Difficultés de considérer plusieurs niveaux d'abstractions - Difficulté de déterminer quelles parties de la réalité doivent être modélisées.

Tableau 2: Comparaison entre les différentes approches de modélisation par simulation (Chaouni Benabdellah et al, 2016)

Force est de constater après l'analyse du tableau 2, que les SMA est le paradigme le plus adapté aux caractéristiques de la complexité et par conséquent aux propriétés des deux sous-systèmes : CLH et Covid-19, analysés respectivement dans la deuxième et la troisième partie de ce papier.

En effet, l'intérêt d'opter pour une approche multi-agents pour modéliser notre système tient au fait que ce dernier est composé de deux sous-systèmes CLH et Covid-19 aussi complexes l'un que l'autre, ce qui accroît sa complexité de manière substantielle. Chaque sous-système comporte des entités ou bien des agents hétérogènes impliqués dans une dynamique et des interactions incessantes intra et inter sous-systèmes (figure 3) :

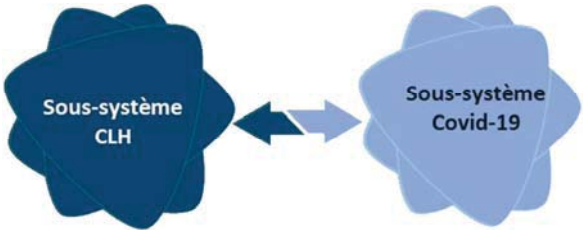


Figure 3 : Interactions intra et inter sous-systèmes

Pour illustrer ces interactions de manière pratique, nous pouvons dire que la crise du Covid-19 a eu des impacts sur tous les aspects de la CLH (processus, flux etc.), en retour, cette dernière va riposter par un ensemble de mesures pour parer aux effets de la pandémie. Nous estimons donc qu'une modélisation à base d'agents de l'ensemble de ces interactions et des comportements émergents permet de mieux comprendre les mécanismes produits et observés dans notre système. L'objectif ultime étant de mesurer l'impact du Covid-19 sur la CLH, mais aussi de juger la pertinence des mesures prises pour y faire face.

5 CONCLUSION

En somme, la crise sanitaire provoquée par le Covid-19 a bouleversé considérablement les systèmes de santé à travers le monde. Les ressources nécessaires pour contrer ses effets désastreux ont fait défaut surtout au pic de la pandémie, ce qui remet en cause le rôle central de la CLH comme support incontournable du processus de soins.

A travers ce papier, nous avons montré que la CLH qui est un système complexe fait face à un phénomène aussi complexe (la propagation du Covid-19), débouchant ainsi sur un système très complexe [CLH & Covid-19] dont la compréhension et par la suite la maîtrise passe par une modélisation en utilisant l'une des approches spécifiques aux systèmes complexes, en particulier les SMA, du fait que c'est le paradigme le mieux adapté et qui correspond le plus aux exigences des systèmes complexes. Ladite modélisation va nous permettre d'abord de mieux comprendre notre système afin de le maîtriser, et à terme, de faire face à l'impact du Covid-19 et de toute crise sanitaire d'envergure similaire sur la CLH et par conséquent sur le processus de soins.

Par ailleurs, nous pensons que les actions, les réactions, les interactions etc. qui émergeraient dans notre système seraient nécessairement les résultats des effets du Covid-19 sur la CLH et des mesures prises pour y faire face, d'où l'intérêt de se pencher sérieusement sur ces deux aspects à travers une analyse assez détaillée, pour disposer in fine de tous les éléments nécessaires à la modélisation multi-agents du système étudié.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement Monsieur Youssef BENGHABRIT, Directeur du CEDoc de l'ENSAM de Meknès et responsable de notre équipe pour son soutien et son accompagnement indéfectibles, mais aussi pour sa contribution précieuse à la réalisation de ce travail et de tous nos travaux de recherche.

REFERENCES

Benabdellah.C. A., Bouhaddou. I., Benghabrit. A. & Zemmouri.E.M. 2016. Big Data for Supply Chain Management: Opportunities and Challenges.

Benabdellah.C. A., Bouhaddou. I., Benghabrit. A. 2017. « Complexité de la chaîne logistique : compromis entre modèle analytique et un modèle de simulation agents » CIGIMS 2017 (ENSAM-Meknès, MAROC).

Benabdellah.C. A., Bouhaddou. I., Benghabrit. A. 2018. « Supply Chain challenges with Complex Adaptive System perspective ». World Conference on Information Systems and Technologies.WorldCIST'18.

Benabdellah.C. A., Bouhaddou. I., Benghabrit. A. 2019. « Holonic multi-agent system for modeling complexity structures of New Product Development process ». 2019 4th World Conference on Complex Systems (WCCS), 1-6, 2019.

Benabdellah.C.A., Bouhaddou. I., Benghabrit. A. 2020. Complexity drivers in engineering design. Journal of Engineering, Design and Technology.

Chan, S, 2001. Complex adaptative systems.EDS.83 Research Seminar in Engieneering Systems October 31, 2001/November 6,200.

Chow. G., Heaver. T. et Henriksson. L. 1994. «Logistics performance: Definition and Measurement», International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, vol 24, n°1.

Di Martinelly, C., Guinet. A. et Riane. F. 2005. Chaîne logistique en milieu hospitalier : modélisation des processus de distribution de la pharmacie. 6e Congrès international de génie industriel, 7-10 juin, Besançon, France.

Erik W. Aslaksen. 2009. Designing Complex Systems Foundations of Design in the Functional Domain. Complex and Enterprise Systems Engineering Series.

Karsky, M, 2004. La dynamique des systèmes complexes ou la systémique de l'ingénieur, référence AG1565.

Khatrouch. I., El mhamedi. A., Boujelben. Y. et Kermad. L. 2010. Analyse des risques dans la chaîne logistique hospitalière par l'approche systémique : application de la méthode MADSMOSAR, GISEH.

Labarth, O. 2006. Modélisation et simulation orientées agents de chaînes logistiques dans un contexte de personnalisation de masse : modèles et cadre méthodologique, thèse de Doctorat, faculté des sciences de l'administration, université Laval, Québec.

Ladyman. J., Lambert. J. et Wiesner, K. 2013. What is complex system ?. European Journal for Phylosophy of science.

Landry S. et Beaulieu M., 2000. "Étude internationale des meilleures pratiques de logistique hospitalière ", Cahier de recherche n° 00-05, HEC Montréal.

Leverson, N. 2004. A new accident model for engieneering safer system.Safety science.

Morin, E. 2005. Introduction à la pensée complexe. Edition du Seuil, Collection Points.

Morin, E. 2007. "Restricted complexity, general complexity." Worldviews, science and us: Philosophy and complexity.

Parrot, L, 2002.Complexity and the limits of Ecological Engineering.Transaction of the ASAE.

Sampieri N., Bongiovanni I., 2009. " Enjeux et perspectives des pratiques logistiques : pour une amélioration globale de la performance – Le cas de l'hôpital public français ", RIRL 2000 – Les Troisièmes Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique, Trois-Rivières, CRET-LOG.19P.

Sheard, S. 2006. Complex Systems Science and its Effects on Systems Engieneering, Euopean Systems Engieneering Conference, Edinburgh, UK, 18-20

Simon, H. A. 1962. The architecture of complexity.Proceedings of the American philosophical society.

Tounsi, J. 2009. Modélisation pour la simulation de la chaîne logistique globale dans un environnement de production PME mécatroniques, thèse de Doctorat, Université de Savoie, France.

Weaver, W. 1948. Science and complexity. In American Scientist, 36 : 536-544.

Zwirn, H.P, 2006. Les systèmes complexes. Mathématiques et biologie, Paris, Editions Odile Jacob. P 219.

SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES POUR AIDER L'INGENIERIE DES RISQUES EN REPONSE A APPEL D'OFFRES

E. Vareilles [a, *], T. Coudert [b], M. Aldanondo [c], L. Geneste [b], D. Guillon [c], R. Ayachi [b,d]

(a) ISAE SUPAERO, Toulouse, France
(b) ENIT Tarbes, LGP, France
(c) IMT Mines Albi, Albi, France
(*) CA : elise.vareilles@isae-supaero.fr

RESUME : *L'élaboration d'une offre, lors d'une réponse à appel d'offres, est un processus complexe, généralement caractérisé par des informations partielles et imprécises ainsi qu'un temps de réponse limité. Adoptant le point de vue des entreprises soumissionnaires, cet article se concentre sur l'ingénierie des risques portant sur les activités du processus de fabrication d'un produit, de sa conception à sa livraison. Plus précisément, cet article propose un système à base de connaissances pour aider à l'identification et l'analyse (probabilité / impact) des risques qui peuvent survenir au cours du processus de fabrication. Cette identification des risques a lieu durant la phase de réponse à appel d'offres, de sorte que les risques identifiés et leurs impacts peuvent être pris en compte dans l'offre faite au client. Grâce au système proposé, les connaissances en matière d'ingénierie des risques peuvent être capitalisées et réutilisées pour aider à l'élaboration de nouvelles offres. Les connaissances en matière d'ingénierie des risques sont structurées par un modèle unifié. Pour aider les décideurs dans leur processus d'ingénierie des risques, une méthode de réutilisation, inspirée du raisonnement par analogie, est proposée pour exploiter les connaissances pertinentes. Le système proposé permet d'obtenir des offres plus précises, moins risquées et dans lesquelles il y a une forte confiance à livrer ce qui a été présenté au client. Ce travail peut être étendu pour modéliser et choisir les meilleures stratégies de mitigation des risques.*

MOTS-CLES : *Ingénierie des risques, système à base de connaissances, appel d'offres, raisonnement à partir de cas, réutilisation des connaissances, taxonomie.*

1 INTRODUCTION

Répondre à un appel d'offres est un processus complexe où les entreprises soumissionnaires doivent proposer au client potentiel la meilleure réponse en termes de solution technique, prix de la solution et délai de livraison, afin de remporter l'affaire. Cet article s'intéresse au processus de fabrication, allant de la conception à la livraison, qui doit être effectué quand l'appel d'offre est remporté. Une fois qu'une opportunité est détectée et qu'il est décidé d'y répondre sur la base des exigences exprimées dans le cahier des charges, une solution technique doit être élaborée. Sur cette base, une solution d'offre commerciale est rédigée et une proposition d'offre est transmise au client (Chalal et Ghomari 2006). Si elle est acceptée, la solution technique doit être livrée conformément aux exigences du client.

De nos jours, les clients sont friands d'options spécifiques auxquelles les fournisseurs de produits ou de systèmes doivent répondre. Les entreprises soumissionnaires peuvent être confrontées à deux situations lorsqu'elles élaborent des solutions techniques : i) une situation routinière, où les éléments de la solution sont d'ores-et-déjà préconçus, et sont réutilisés dans la solution technique courante ; ou ii) une situation non routinière, où certains éléments de la solution technique doivent être conçus, au moins partiellement, pour satisfaire aux exigences du client. Ces différentes situations, dans le cadre d'un appel d'offres, ont été étudiées dans Sylla et al. (2017).

Dans notre travail, nous nous intéressons aux situations non routinières où un produit (ou un système) doit être livré et où des risques peuvent survenir sur le processus de fabrication associé. Si le fournisseur veut rester compétitif et avoir confiance en sa capacité à livrer le produit tel qu'énoncé dans le cahier des charges client et proposé en réponse à l'appel d'offre, ces risques doivent être caractérisés et des actions spécifiques doivent être proposées pour les atténuer. Le processus que nous appelons "ingénierie des risques" dans cet article permet de caractériser les risques qui peuvent survenir pendant l'exécution d'un processus de fabrication, pour les évaluer et définir des actions de mitigation (Nguyen et al, 2013).

Dans nos travaux, une offre est composée à la fois d'une solution technique et de son processus de fabrication, caractérisé par une date de mise à disposition et son coût (Guillon et al., 2017). Le processus d'ingénierie des risques consiste à identifier les risques qui peuvent survenir sur chaque tâche du processus de fabrication et à déterminer comment celles-ci peuvent être impactées par ces risques. La réalisation d'un processus d'ingénierie des risques nécessite généralement un haut niveau d'expertise et demande un investissement important en termes de temps et de ressources. Dans cet article, nous proposons d'aider les acteurs en charge de l'ingénierie des risques en définissant un outil à base de connaissances qui exploite de manière conjointe des connaissances expertes et des expériences passées d'ingénierie des risques, afin de caractériser les risques et leurs impacts potentiels. Cela permettra aux entreprises : i) de répondre à un plus grand nombre d'appels d'offres, ii) d'être plus confiantes dans les offres envoyées aux clients et iii) de diminuer le niveau d'expertise requis pour réaliser l'ingénierie des risques. Les contributions de cet article sont les suivantes : (i) un modèle qui permet de capitaliser les connaissances d'experts ou *Connaissances Risque* et les expériences passées ou *Expériences Risque* en matière d'ingénierie des risques qui est conforme à la norme ISO 31000 (ISO, 2009) et (ii)

une méthode pour la réutilisation des connaissances et des expériences passées pour soutenir le processus d'ingénierie des risques (caractérisation des risques, définition des probabilités d'occurrence (Hillson, 2005) et quantification des impacts des risques). L'approche proposée est adaptée du principe CBR (Case-Based reasoning, Aamodt et Plaza, 1994) et permet de capitaliser et de réutiliser les *connaissances risque* et les *expériences risque* (Bergmann, 2002). Le modèle ainsi que la méthode proposée visent à être exploités grâce à un outil informatique.

Dans la littérature, un risque est généralement défini comme un événement incertain qui peut affecter un projet de manière positive ou négative (Hillson, 2005). Dans nos travaux, un risque est un événement perturbateur qui peut apparaître durant la réalisation d'une tâche du processus de fabrication et ses conséquences ou impacts peuvent être quantifiés. Dans Nguyen et al. (2013) et Marmier et al. (2014), les conséquences des risques impactent les descripteurs de projet (ou KPI) tels que le coût, la date de livraison ou la charge de travail. Dans leurs travaux, des méthodes permettant de modéliser et de simuler les risques et leurs impacts, et de les atténuer sont proposées. Toutefois, seules les connaissances des experts sont utilisées pour identifier et définir les risques et leurs impacts.

Parmi les nombreuses méthodes de capitalisation et de réutilisation des connaissances, le retour d'expérience est utilisé dans de nombreux domaines (Bergmann, 2002 ; Kamsu-Foguem et al., 2008). Une expérience est un élément de connaissance contextualisé qui peut être réutilisé dans des contextes similaires. La réutilisation de l'expérience peut être basée sur des taxonomies et des ontologies (par exemple dans Kamsu-Foguem et al., 2008). La méthode CBR est généralement utilisée afin de sélectionner des expériences passées similaires au problème courant, de les adapter à celui-ci et de capitaliser les résultats pour une réutilisation future (Aamodt et Plaza, 1994).

La suite de cet article est structurée de la façon suivante. Dans la section 2, le modèle qui permet de capitaliser les *Connaissances Risque* et les *Expériences Risque* est détaillé. Dans la section 3, les notions de *Connaissances Risque* et d'*Expériences Risque* sont posées. La section 4 permet de présenter notre système à base de connaissances avant, en section 5, de conclure avec les perspectives de ce travail de recherche.

2 MODELE DE CONNAISSANCES

Le modèle de connaissances proposé dans ce travail s'inspire de Nguyen et al. (2013) et de Ayachi et al. (2018). Il permet de représenter et de caractériser les différentes entités et leurs relations nécessaires pour modéliser la connaissance des risques sur un processus de fabrication. L'objectif de ce modèle est de capitaliser les connaissances et les expériences en matière d'ingénierie des risques. À partir des informations standard décrites dans Ayachi et al. (2018), des attributs spécifiques sont ajoutés : les valeurs possibles sont issues d'une taxonomie de concepts. Les différentes entités sont décrites dans la section suivante. Elles ne sont liées qu'au processus, aux tâches, aux risques et à leurs impacts.

2.1 Entités Risque à capitaliser

Les entités du modèle UML présenté en Figure 1 sont :

- Delivery Process : il représente le processus de fabrication global et rassemble l'ensemble des tâches à réaliser pour fabriquer le produit, de la conception à la livraison. Il est décrit par un nom, un coût total et une durée totale. Il est associé à un concept qui représente le type de processus (par exemple, procesuss de développement d'un nouveau vélo, processus de fabrication d'un vélo standard, etc) ;
- Task : elle représente une tâche du processus de fabrication. Chaque tâche est décrite par son nom, son coût et sa durée. Elle est associée à un concept qui permet de décrire plus finement celle-ci, par exemple *Detailed Design*, *Provision*, *Manufacturing* ;
- Risk : il correspond à un risque qui peut survenir lors de la réalisation d'une tâche. Il est associé à la tâche sur laquelle le risque peut se produire, nommée *tâche source*. Il est décrit par un nom, une probabilité d'occurrence et un concept correspondant au type de risque, par exemple, *Missing Resources*, *Delay*, *Inadequate Method* ;
- Impact : il représente l'impact d'un risque sur une tâche spécifique du processus de fabrication, nommée *tâche cible*. Il est modélisé par l'augmentation de la valeur du coût et/ou de la durée de la tâche cible lorsque le risque correspondant se produit. Deux types d'impact ont été définis : *Additionnal* (la valeur de l'impact est ajoutée à la valeur nominale), *Proportional* (la valeur de l'impact est multipliée par la valeur nominale).

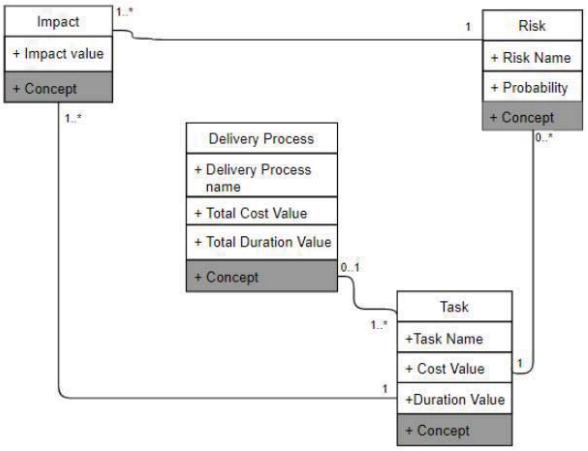


Figure 1 : Modèle UML de risque

Un risque est associé à une seule tâche *source* du processus de livraison. Une tâche *source* peut être liée à plusieurs risques. Un risque est associé à un ou plusieurs impacts et un impact est associé à un seul risque. Un impact est associé à une seule tâche *cible* (c'est-à-dire une tâche impactée). Une tâche *cible* peut être impactée par plusieurs risques et impacts.

Un exemple de processus de fabrication composé de trois tâches (*Detailed Design*, *3D Printing* et *Delivery*) est présenté en Figure 2. La tâche *Detailed Design* est source

du risque R1 (probabilité d'occurrence = 60%). Si R1 se produit, la tâche *3D Printing* est impactée (c'est-à-dire que ses valeurs de coût et/ou de durée peuvent augmenter).

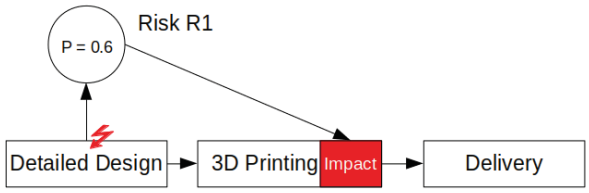


Figure 2 : Exemple de Tâche Source, Risque et Tâche Cible

2.2 Taxonomie de risques

Une taxonomie permet de rassembler et de classer les concepts d'un domaine particulier, afin de les capitaliser. Cette classification est une hiérarchie basée sur une relation de spécialisation/généralisation entre les concepts. La taxonomie proposée dans ce travail est représentée dans la Figure 3. A partir du concept Universel, quatre concepts différents sont spécialisés : *Project, Task, Risk et Impact*. Ces concepts doivent être spécialisés en fonction du domaine de l'entreprise (types de processus de fabrication, tâches, risques et impacts).

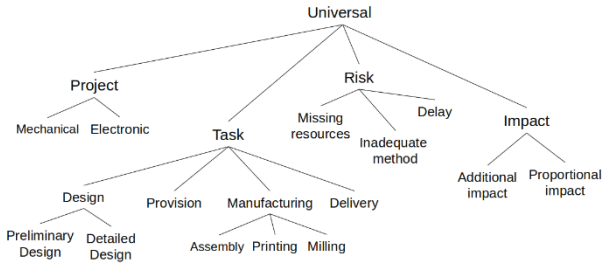


Figure 3 : Taxonomie de concepts Risque

Le concept Project est spécialisé en *Mechanical* et *Electronic*. Le concept *Task* est spécialisé en *Design*, *Provision*, *Manufacturing* et *Delivery*. Le concept *Risk* est spécialisé en *Missing Resources*, *Inadequate Method* et *Delay*. Le concept *Impact* est spécialisé en *Additional Impact* et *Proportional Impact*. Tous ces concepts peuvent être utilisés pour générer des instances du modèle (Fig. 1) afin de capitaliser des connaissances spécifiques à chaque concept, qui peuvent être ensuite réutilisées pour aider à l'ingénierie des risques. À cette fin, les définitions de *Connaissances Risque* et *Expériences Risque* sont données dans la section suivante.

3 CONNAISSANCES RISQUE VERSUS EXPERIENCES RISQUE

Le modèle d'ingénierie des risques (Fig. 1) permet de capitaliser deux types de connaissances : celles fournies par un expert en risques et celles issues d'expériences passées d'ingénierie des risques. Dans notre approche, ces connaissances sont appelées respectivement *Connaissances Risque* et *Expériences Risque*.

3.1 Connaissances Risque

Les *Connaissances Risque* représentent des connaissances d'experts. Par exemple, un expert sait que chaque fois qu'une tâche de concept *Manufacturing* est réalisée, le risque d'avoir des ressources manquantes, concept *Missing Resources*, peut survenir. Cependant, il ne sait pas quel est l'impact d'un tel risque, ni sa probabilité d'occurrence, par exemple. Afin de représenter et de capitaliser ces connaissances, l'expert peut créer une *Connaissance Risque* qui peut être réutilisée par toute personne impliquée dans le processus d'ingénierie des risques. Une *Connaissance Risque* est une instance (partielle) du modèle de la Figure 1 et elle est représentée dans la Figure 4.

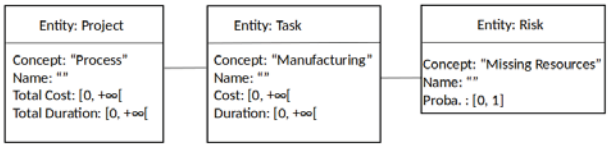


Figure 4 : Exemple de Connaissance Risque

L'entité *Project* est instanciée. Comme il s'agit d'une connaissance valide pour tout type de processus, le concept est *Process*, le nom n'est pas donné et la durée et le coût ne sont pas fournis. Dans l'entité T*ask*, le concept de tâche est *Manufacturing* et le nom, le coût et la durée ne sont pas indiqués. Enfin, pour l'entité *Risk*, le concept est *Missing Resources*, le nom n'est pas fourni et la probabilité d'occurrence est inconnue (entre 0 et 1). Cette connaissance risque peut être interprétée comme : "dans le cadre d'un processus de fabrication, pour toute tâche de fabrication, la personne responsable de l'ingénierie des risques doit prendre en compte le risque de manque de ressources".

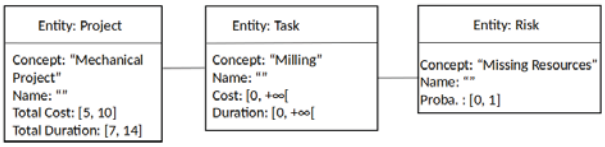


Figure 5 : Exemple de Connaissance Risque plus spécialisée

Les *Connaissances Risque* sont plus ou moins spécialisés selon les entités instanciées, les valeurs des attributs et le niveau des concepts dans la taxonomie (c'est-à-dire leur distance par rapport au concept Universel). La *Connaissance Risque* donnée dans la Figure 5 est plus spécialisé que celle de l'exemple de la Figure 4. Elle peut être interprétée comme "pour tout projet mécanique d'un coût compris entre 5 et 10, et d'une durée comprise entre 7 et 14 jours, y compris tâche de concept *Milling*, le responsable de l'ingénierie des risques doit prendre en compte le risque de concept *Missing Resources*.

On peut observer que l'entité process permet d'exprimer dans quel contexte les connaissances peuvent être utilisées. Une *Connaissance Risque* peut être identifiée par le biais d'un apprentissage par exemple, mais cela n'est pas traité dans cet article.

3.2 Expériences Risque

Les *Expériences Risque* représentent les expériences d'ingénierie des risques obtenues lors de la réalisation de processus de fabrication réels. Ce sont des éléments de connaissance contextualisés qui peuvent être réutilisés dans des contextes similaires (Kamsu-Foguem et al., 2008). Après la fin du processus d'ingénierie des risques et/ou après l'exécution du processus de fabrication (c'est-à-dire la livraison du système ou du produit au client), une expérience peut être instanciée à partir du modèle de la Figure 1 et stockée dans une base de connaissances. Cette expérience est appelée *Expériences Risque* et peut être réutilisée en utilisant une méthode inspirée du CBR. Une *Expériences Risque* peut être considérée comme une connaissance qui doit être utilisée dans son contexte spécifique. Une *Expériences Risque* est une connaissance contextualisée qui peut être utilisée dans un contexte similaire. Dans la section suivante, le système à base de connaissances qui permet d'exploiter les deux types de connaissances (*Connaissances Risque* et *Expériences Risque*) est décrit.

4 SYSTEME A BASE DE CONNAISSANCES

Le système à base de connaissances proposé s'inspire de la méthode par analogie ou CBR (Case-Based Reasoning) et du processus standard ISO 31000 (ISO 2018) afin d'aider le processus d'ingénierie des risques. L'utilisation de la norme ISO 31000 permet à notre système à base de connaissances d'être conforme aux normes utilisées dans les entreprises. Elle est brièvement présentée dans la section suivante avant la présentation de notre approche CBR.

4.1 Processus d'ingénierie des risques

Le processus d'ingénierie des risques développé dans cet article est basé sur le processus de gestion du risque proposé par la norme ISO 31000 (2018). Trois phases principales sont impliquées (Figure 6) : la définition du contexte ou *Establishing the Context*, l'évaluation du risque ou *Risk Assessement* et le traitement du risque ou *Response/Treatment*.

La gestion des risques, dans le processus d'appel d'offres, commence une fois que le contexte est défini et que l'offre est élaborée. Le contexte de gestion des risques est défini par le processus de fabrication dans notre travail. Il peut être complété par des informations sur le client, sur la conjoncture économique de l'offre mais aussi sur le produit ou le système à livrer.

L'évaluation des risques consiste en l'identification, l'analyse et l'évaluation des risques. Tous les risques potentiels qui peuvent survenir au cours de la réalisation du processus de fabrication doivent être : i) identifiés (c'est-à-dire déterminer leur nature, ou concept), ii) analysés et évalués afin de définir leur probabilité et leurs impacts sur le processus. Le traitement des risques consiste à définir la meilleure manière d'atténuer les risques au moyen d'actions préventives et/ou correctives.

Cet article est axé sur la phase d'évaluation des risques ou *Risk Assessment.* Un système à base de connaissances est proposé afin d'aider les décideurs à mieux identifier et à analyser/évaluer les risques et leurs impacts. La Figure 6 synthétise les liens entre la norme ISO 31000 et la méthode sur nous proposons. Trois phases de la norme ISO 31000 sont supportées par nos propositions (symbolisé par les cubes).

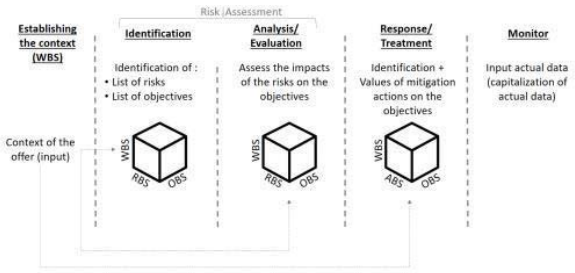


Figure 6 : Ingénierie des risques selon la norme ISO et CBR

La méthode CBR est adaptée à notre travail comme le montre la Figure 7. Elle consiste à identifier les *Connaissances Risque* et les *Expériences Risque* dans la base de connaissances afin de les adapter au processus de fabrication courant. L'approche est appliquée tâche après tâche.

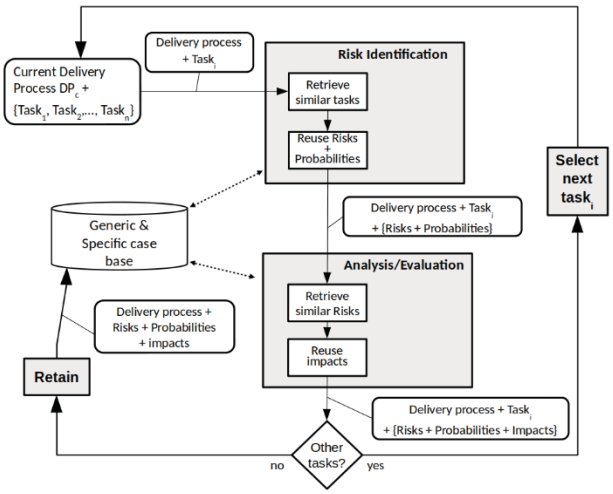


Figure 7 : Approche inspirée du CBR appliquée à l'ingénierie des risques

Une tâche (cas cible - tâche i) est sélectionnée dans le processus fabrication courant. Pour ce couple (concept Taks et concept Process), les connaissances pertinentes (*Connaissances Risque* et *Expériences Risque*) sont remontées de la base de connaissances. Les risques sont identifiés à partir de ces connaissances et adaptés au cas cible de la tâche $_i$. Ensuite, la probabilité est obtenue selon le même principe : lorsque des risques similaires sont liés à une tâche similaire dans les connaissances pertinentes, la probabilité peut être calculée. Enfin, à partir de ces connaissances, les impacts peuvent être adaptés au processus de fabrication courant.

Lorsque toutes les tâches du processus de fabrication ont été traitées, la mitigation des risques peut être réalisée au moyen du même principe. Les tâches de mitigation peuvent être identifiées à partir de tâches similaires avec

des risques similaires et adaptées au processus courant. Notons que le traitement des risques n'est pas approfondi dans cet article.

Une fois toutes les tâches traitées, le processus d'ingénierie des risques est terminé. Il peut être stocké dans la base de connaissances après validation par un expert, si celui-ci le juge intéressant à capitaliser. Si l'offre est acceptée, le processus de fabrication va se dérouler et des risques peuvent survenir (phase *Monitoring* Figure 6). Les attributs peuvent alors être mis à jour avec des données réelles pour ce processu. Cette phase de suivi des affaires et de peuplement de la base de connaissances n'est pas abordé dans cet article.

4.2 Identification des risques

Cette section détaille la phase d'identification des risques.

4.2.1 Recherche des risques pertinents

La phase d'identification des risques nécessite un cas cible défini par une tâche $_i$ et un processus de fabrication courant DP_c (couple ($Task_i$, DP*c*)). La phase de recherche permet d'identifier les cas source (connaissances pertinentes) de la base de connaissances, qui peuvent être soit des *Connaissances Risque,* soit des *Expériences Risque*. Afin de les comparer avec le cas cible, la phase de recherche se base sur les concepts de la tâche $_i$ et de DP*c*. Le concept de la tâche $_i$ est noté $C(Task_i)$ et celui du processus DP, C(DP). Selon le type des connaissances source (*Connaissances Risque* ou *Expériences Risque*), la phase de réutilisation diffère.

***Connaissances Risque* :** Soit DP_g le processus de fabrication du cas source et DP_c le processus de fabrication du cas cible. Soit la $tâche_j$ issue d'une *Connaissances Risque* qui doit être comparée à la $tâche_i$ du cas cible. Si le concept de la $tâche_i$ est égal ou plus spécialisé que le concept de la $tâche_j$ et si le concept du processus de fabrication actuel est égal ou plus spécialisé que le concept du processus de fabrication issu de la *Connaissances Risque* ($(C(Task_i) \leq C(Task_j)) \wedge (C(DP_c) \leq C(DP_g))$, alors tous les risques liés à la $tâche_j$ de la *Connaissance Risque* sont réutilisés (ils sont copiés dans le processus courant). Cela signifie qu'il existe une *Connaissance Risque* avec des concepts plus généraux pour la tâche et pour le processus de fabrication courant. Il s'agit donc d'une connaissance qui doit être utilisée : tous les risques liés à ce concept de tâche doivent être réutilisés.

Expériences Risque : une *Expérience Risque* est liée à un processus de fabrication spécifique (DP) et elle doit être comparée au cas cible. Dans cette situation, la mesure de similarité de Wu et Palmer (1994) entre deux concepts C1 et C2 sont utilisés : sim(C1, C2) = 2 ∗ profondeur(C_{com})/profondeur(C1) + profondeur(C2). L'expression (Ck) correspond au nombre d'arcs entre le concept de base *Universel* et le concept Ck dans la taxonomie. C_{com} est le parent commun le plus proche de C1 et C2 dans la taxonomie. Par conséquent, la similarité entre le processus cible (DP_c , $Task_i$) et le processus source ($Task_j$, DP_s) est calculée en multipliant la similarité entre les concepts des tâches et la similarité entre les concepts des processus de fabrication : sim(cible, source) = $sim(C(Task_i), C(Task_j)) \times sim(C(DP_c), C(DP_s))$.

Toutes les *Expériences Risque* qui sont similaires au processus cible sont présentées au responsable de l'ingénierie des risques qui peut ensuite choisir de réutiliser ou non les risques associés. Lorsqu'un risque est réutilisé, toutes les valeurs des attributs doivent être adaptées. Le concept est conservé, mais le nom du risque et la valeur de la probabilité doivent être modifiés. Pour la valeur de probabilité, la liste des *Expériences Risque* récupérés est utilisée.

La réutilisation des *Connaissances Risque* et des *Expérience Risque* est décrite dans les sections suivantes.

4.2.2 Exploitation des Connaissances Risque

La Figure 8 représente le processus cible correspondant à un processus de fabrication appelé "Industry 4.0" (concept = *Mechanical*) composé de trois tâches :

- *Printer programming* (concept = *Detailed Design*),
- *3D printing* (concept = *Printing*),
- *Transport to China*, (concept = *Delivery*).

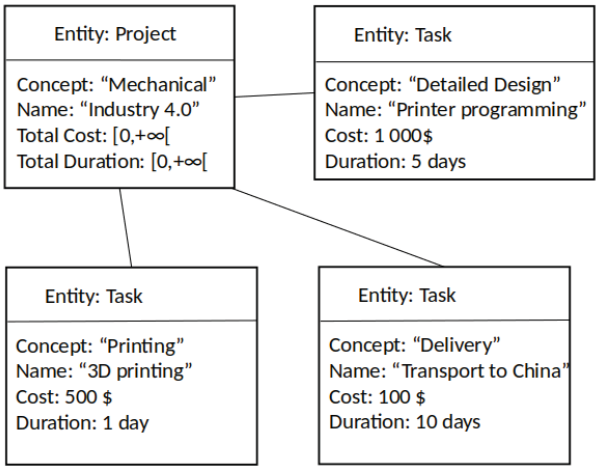


Figure 8 : Exemple de processus cible

La première phase de recherche permet de retrouver la *Connaissances Risque* représentée dans la Figure 9.

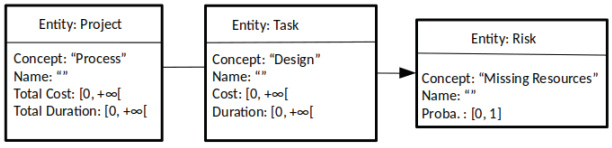


Figure 9 : Exemple de recherche de Connaissances Risque

Dans cette *Connaissance Risque*, une tâche générique (concept = *Design*) est liée à un risque générique (concept = *Missing Resources*). Elles sont liées à un processus générique (concept = *Process*). Le concept de la tâche *Printer programming* du processus cible est plus spécialisé que le concept de la tâche de la *Connaissance Risque* (*Detailed Design* ≤ *Design*). Pour les processus de livraison, nous avons : Mechanical ≤ Process. Par conséquent, la *Connaissances Risque* doit être réutilisée. Le concept de risque *Missing Resources* est réutilisé dans le processus

cible et l'entité est adaptée avec le nom *Machine unavailable* pour le risque (Figure 10).

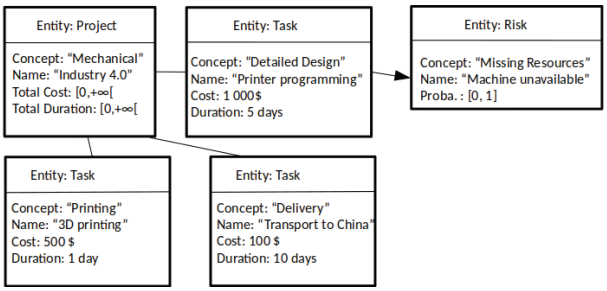


Figure 10 : Adaptation d'un risque issu d'une Connaissance Risque

En utilisant les E*xpériences Risque* pertinentes, d'autres risques peuvent également être ajoutés. L'adaptation doit être poursuivie afin de définir la probabilité de chaque risque ajouté.

4.2.3 Exploitation des Expériences Risque

Les Expériences Risque représentent les expériences passées d'ingénierie des risques réalisée sur des processus réels. Elles sont stockées dans l'outil logiciel. Les *Expériences Risque* retrouvées par l'outil sont similaires aux processus cible. Les *Expériences Risque* sont présentées à la personne en charge de l'ingénierie des risques qui peut ou pas les ajouter au processus de fabrication courant. Afin d'aider cette personne à choisir les risques à ajouter et aussi à évaluer leur probabilité d'occurrence, les informations remontées des *Expériences Risque* peuvent être exploitées. Une répartition des *Expériences Risque* remontées se fait suivant la taxonomie des risques. Pour chaque risque, des scores sont calculées automatiquement à partir de la somme des similarités au processus cible. Dans la Figure 11, à partir de dix *Expériences Risque* remontées au regard du processus cible de la Figure 8, deux concepts de risque différents ont été identifiés.

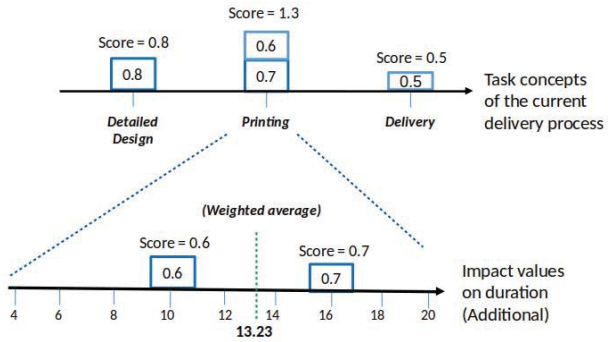


Figure 11 : Distribution des Expériences Risque selon la valeur de leur probabilité

Les *Expériences Risque* sont représentées par des rectangles contenant leur similarité. Dans notre exemple, trois des *Expériences Risque* similaires pour lesquelles aucun risque ne s'est produit sur la tâche de concept *Design* ou similaire sont remontées. Pour le concept *Missing Resources*, trois tâches similaires ont été remontées (similarité au concept *Design* : 0,9, 0,8 et 0,5 ; Score = 2,2). Pour le concept *Delay*, quatre tâches similaires ont été remontées (similarité au concept *Design* : 0,8, 0,7, 0,7 et 0,8 ; Score = 3,0) et trois tâches similaires ont été remontées sans aucun risque associé (similarité : 0,5, 0,5 et 0,5 ; Score = 1,5). En ce qui concerne les scores, si le choix de réutiliser un risque est fait, la probabilité peut être évaluée. Pour un concept de risque donné, la probabilité est la moyenne pondérée des probabilités où les pondérations sont données par le score obtenu par chaque valeur de probabilité. Dans la Figure 11, pour le concept *Missing Resources* la probabilité correspondant à chaque *Expériences Risque* est représentée. Une tâche (similarité : 0,9) a été associée au risque *Missing Resources* avec une valeur de probabilité de 0,4. Deux tâches (similarité : 0,8 et 0,5) ont été associées à ce risque avec une valeur de probabilité de 0,8. La probabilité du risque *Missing Resources* associé à la tâche *Detailed design* (Figure 8) est calculée en utilisant la moyenne pondérée des opération. Le processus courant est alors mis à jour avec ce nouveau risque et un nom doit lui être donné. La Figure 12 illustre le processus courant après adaptation où le nom du risque a été défini *Machine unavailable* et sa probabilité est de 0,58.

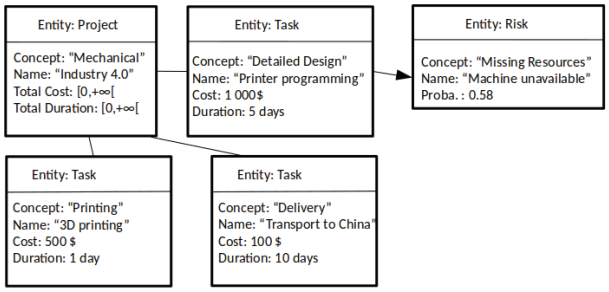


Figure 12 : Adaptation de la probabilité d'un risque

4.3 Evaluation des impacts des risques

Le processus cible pour cette phase est le processus de fabrication courant DP_c , la $tâche_i$ et les risques associés (y compris leurs probabilités d'occurrence). L'objectif est de définir quelles sont les tâches cibles et comment leurs valeurs de coût et/ou de durée sont impactées par les risques. Par conséquent, la recherche est effectuéee de manière itésociés ($Task_i$, $Risk_{ik}$). Si *n* risques sont associés à la tâche i, n recherches doivent être effectuées.

4.3.1 Exploitation des connaissances Risque

La recherche permet d'obtenir des *Connaissances Risque* et des *Expériences Risque* pertinentes à partir de la base de connaissances. Seules les connaissances pour lesquelles le concept de processus, le concept de tâche, le concept de risque et le concept de tâche impactée sont égaux ou plus généraux que ceux du processus cible sont remontées. La Figure 12 représente un processus cible et la Figure 13 représente une *Connaissance Risque* extraite de la base de connaissances.

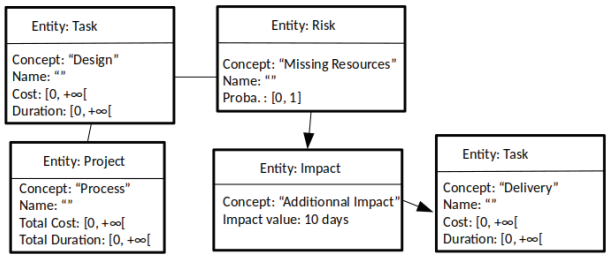


Figure 13 : Connaissance Risque avec impact sur une tâche cible

On peut vérifier que (Mechanical ≤ Process), (*Detailed design ≤ Design*), que les concepts de risque sont identiques (*Missing Resources*) et qu'il y a une tâche du processus cible qui a le même concept que celui de la tâche impactée (*Delivery*). Ensuite, l'impact de la *Connaissance Risque* est réutilisé. La durée de la tâche *Delivery* sera augmentée de 10 jours si le risque nommé *Machine unavailable* ayant pour concept *Missing Resources* se produit (Figure 14).

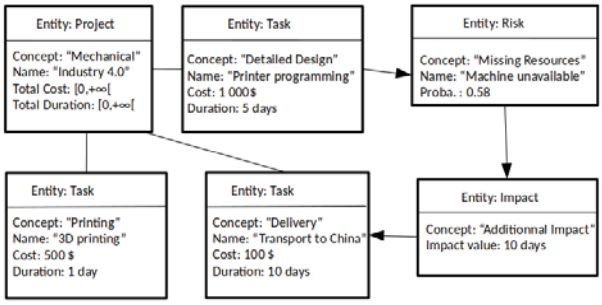


Figure 14 : Réutilisation d'un impact d'une Connaissance Risque

4.3.2 Exploitation des Expériences Risque

Les impacts des *Expériences Risque* remontées peuvent être réutilisés ou non par la personne en charge de l'ingénierie des risques. Pour chaque *Expérience Risque* remontée, une mesure de similarité est calculée : sim(cible, source) = sim(C(DP*c*), C(DP*s*)) × sim(C(Task$_i$), C(Task$_j$)) × sim(C(Risque$_k$), C(Risque$_m$)) × sim(C(Task$_q$), C(Task$_r$. La tâche *r* est une tâche impactée de l'*Expérience Risque* et la tâche *q* est une tâche du processus de fabrication courant. La répartition des *Expériences Risque* remontées selon les concepts des tâches du processus de fabrication étudié est construite (Figure 15). Pour chaque concept, un score (somme des similarités) est calculé. Afin d'aider à définir les valeurs d'impact, une distribution des *Expériences Risque* remontées par rapport aux valeurs d'impact est représentée avec les scores. Une moyenne pondérée peut également être utilisée afin de calculer la valeur d'un impact des *Expériences Risque*. Dans la Figure 15, les trois concepts de tâches du cas cible représenté dans la Figure 8 sont représentés avec les différentes *Expériences Risque* (rectangles) et leurs similarités. La tâche du processus de fabrication de concept *Printing* a le score le plus élevé. Elle peut être réutilisée en tant que tâche impactée. La valeur de l'impact peut être déduite de la distribution, partie inférieure de la Figure 15, avec la valeur moyenne pondérée de 13,23 jours supplémentaires (les pondérations sont les scores).

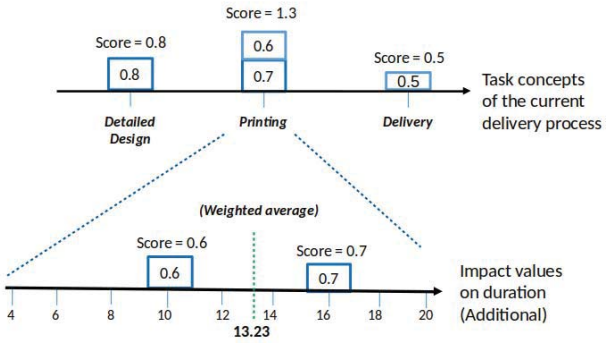


Figure 15 : Distribution des Expériences Risque selon la valeur de leurs impacts

5 CONCLUSION

Cet article propose un modèle pour la formalisation et la capitalisation des connaissances en matière d'ingénierie des risques. Un modèle UML a été proposé pour modéliser la connaissance sur la base d'entités où certaines valeurs d'attributs sont choisies dans une taxonomie de concepts. Les principes de *Connaissance Risque* et *Expérience Risque* ont été détaillés. Une approche pour la réutilisation de connaissances liées au risque a été proposée. Elle s'inspire de la méthode CBR et la norme ISO 31000. Les *Connaissances Risque* et Expériences *Risque* sont identifiées dans une base de connaissances et proposées à la personne en charge de l'ingénierie des risques. Le modèle proposé a été implémenté dans un outil logiciel appelé OPERA, et l'approche proposée a été testée sur des cas d'utilisation issus du monde industriel.

Dans ce travail, le processus d'ingénierie des risques est limité à l'identification et à l'évaluation des risques. Ce travail peut être étendu au traitement des risques. Le modèle ainsi que l'approche de réutilisation proposée pourront être étendu à l'identification des actions de mitigation des risques, à leurs stratégies de traitement ainsi qu'à leurs réductions d'impacts résultant des actions de mitigation.

De plus, le modèle proposé ici concerne l'ingénierie des risques en réponse à appel d'offres. Il serait intéressant d'identifier comment étendre ce modèle aux relations client-fournisseur de façon plus générique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier les partenaires du projet ANR-16-CE10-0010-01 OPERA pour leur investissement dans la co-construction de ce modèle de capitalisation des risques supportant le processus d'ingénierie des risques.

REFERENCES

Aamodt, A. and E. Plaza, 1994. *Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches*. AI Commun. 7, pp. 39–59.

Ayachi, R., D. Guillon, F. Marmier, É. Vareilles, M. Aldanondo, T. Coudert, L. Geneste, and Y. Beauregard, 2018. Towards a Knowledge based Support for Risk Engineering When Elaborating Offer in Response to a Customer Demand. In IEEM 2018 – International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Bangkok, Thailand, pp. 1056–1060.

Bergmann, R., 2002. *Experience Management,* LNAI 2432, pp. 25–44.

Chalal, R. and A. R. Ghomari, 2006. *An approach for a bidding process knowledge capitalization*. In Proceedings of world academy of science, engineering and technology, Volume 13, pp. 293–297.

Guillon, D., A. Sylla, E. Vareilles, M. Aldanondo, E. Villeneuve, C. Merlo, T. Coudert, and L. Geneste, 2017. *Customer supplier relation: Towards a constraint-based model for bids*. In 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), pp. 1067–1071.

Hillson, D., 2005. *Assessing risk probability: Alternative approaches*. In PMI Global Congress proceedings, Prague, Czech Republic.

ISO (2018). *Risk Management – Principles and Guidelines: ISO 31000*.

Kamsu-Foguem, B., T. Coudert, C. Beler, and L. Geneste, 2008. *Knowledge formalization in experience feedback processes: An ontology-based approach*. Computers in Industry 59 (7), 694–710.

Marmier, F., I. Deniaud, and D. Gourc, 2014. *Strategic decision-making in npd projects according to risk: Application to satellites design projects*. Computers in Industry 65, 1107–1114.

Nguyen, T.-H., F. Marmier, and D. Gourc, 2013. *A decision-making tool to maximize chances of meeting project commitments*. International Journal of Production Eco-nomics 142, 214–224.

Sylla, A., E. Vareilles, T. Coudert, K. Kirytopoulos, M. Aldanondo, and L. Geneste, 2017. *Readiness, feasibility and confidence: how to help bidders to better develop and assess their offers*. International Journal of Production Research 55 (23), 7204–7222.

Wu, Z. and M. Palmer, 1994. *Verb semantics and lexical selection*. In 32nd. Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, pp. 133–138.

DIAGNOSTIC ET PRONOSTIC DE LA MAINTENANCE BASEE SUR LA DEGRADATION : CAS D'UN SYSTEME VIBRATOIRE

I. EL ADRAOUI, H. GZIRI, A. MOUSRIJ

Université Hassan I, FST, Départ PSI, Labor IMMII
Settat, Maroc
aimadeladraoui@gmail.com, hgziri@gmail.com,
mousrij@gmail.com

RESUME : *Ce papier traite la présentation d'un dispositif expérimental appelé banc d'essai vibratoire (Moteur, arbre, roue) qui permet de tester, de vérifier et de valider des méthodes liées à l'évaluation, au diagnostic et au pronostic de la santé de phénomène de balourd. L'équilibrage de la roue (disque) est justifié par le fait que la plupart des défaillances des machines tournantes sont liées aux plusieurs défauts parmi lesquels il y'a le balourd. Par conséquent, le système peut être considéré comme critique car leur défaillance diminue d'une manière considérable la disponibilité et la sécurité de la machine, en particulier les éléments tournants à savoir les paliers de guidage.*
L'objectif principal de ce travail est de fournir des données réelles relatives à la dégradation accélérée de la roue (disque) effectuée dans des conditions de fonctionnement variables et/ou constantes, qui sont contrôlées et surveillées en ligne à travers d'un système d'acquisition. Les conditions de fonctionnement sont caractérisées et détectées par un capteur piézo-électrique (accéléromètre).
Enfin, les données de surveillance fournies par le capteur peuvent être utilisées pour un traitement ultérieur afin d'extraire les caractéristiques pertinentes, d'évaluer, de diagnostiquer et de pronostiquer en permanence l'état de santé du système.

MOTS-CLES : *Défaut de balourd, Diagnostic, Pronostic, Maintenance prédictive, banc d'essai vibratoire.*

1 INTRODUCTION

Dans les dernières années, L'analyse vibratoire est devenue une technique prioritaire de la maintenance prévisionnelle particulièrement adaptée aux machines tournantes. Son but en premier est la surveillance de l'état de ces machines au cours de fonctionnement par l'analyse vibratoires des signaux acquis en certains points de mesure préalablement définis. Néanmoins, cette technique relève du domaine de spécialistes vu la spécificité des systèmes à surveiller avec leurs anomalies probables, leurs attentes, leurs exigences de coût et de sécurité, la diversité des moyens de mesure et de traitement, ainsi que la difficulté du diagnostic des spectres mesurés (Semma, EL., et al, Nov. 2014).

Pour contrôler/vérifier les méthodes de diagnostic/pronostic élaborées et publiées dans la littérature, des bancs d'essai dédiés ont été conçus et réalisés par plusieurs centres de recherche et laboratoires à travers le monde selon une grande gamme et variété. La majorité de ces bancs d'essai expérimentaux concernent des composants spécifiques et bien déterminés, tels que des balourds, des roulements, des engrenages, des vérins, des pompes, des pistons, des turbines, etc… Les paragraphes suivants résument les bancs d'essai et les plates formes didactiques expérimentales qui sont encore publiées :

De nombreuses méthodes de pronostic proposées dans la littérature ont été testées sur la dégradation par l'analyse vibratoire. Ainsi, dans (Semma, EL., et al, Nov. 2014), les auteurs ont élaboré une démarche de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire, ensuite ils ont réalisé une enquête auprès d'experts dans le domaine d'analyse vibratoire, a pour objectif de déceler et de hiérarchiser les facteurs clés et les décisions prioritaires à prendre en compte pour réussir un projet d'implantation d'une MCAV. De même, un banc d'essai vibratoire est proposé dans (EL Hannani, A., et al., 2015) pour mesurer et surveiller le niveau de vibration produit par une machine par l'obtention d'un indicateur idéal sur l'état de santé. Dans cette application, les défauts ont été induits au moyen d'une machine tournante à rotor. De plus, dans (Ocak, H., et al., 2007), un banc d'essai dédié a été utilisé pour effectuer des pronostics de défaillance sur les roulements par l'analyse vibratoire de la bague extérieure.

Un banc d'essai lié à une boîte de vitesses et à un pignon a été rapporté dans (Kacprzynski, G., et al., 2004). Dans cette étude, un pignon conique à denture spirale a été amorcé à la fissure et une machine à décharge électrique (EDM) du côté de l'entraînement d'une des dents du pignon pour accélérer d'une manière artificielle la fissuration de la dent. Un grand nombre des accéléromètres ont été placés sur la boîte d'engrenages avec un système de surveillance de la santé et de l'utilisation (HUMS) utilisé pour générer les caractéristiques du comportement vibratoire.

Pour les outils d'usinage, plusieurs de données de fraisage expérimental lié à la fraiseuse universelle pour différentes vitesses, avances et profondeurs de coupe peut être trouvé dans (NSF., I/UCRC, 2012). De même, une plateforme expérimentale a été développée par SIMTech de Singapour (Zhou, J., et al., 2006) pour fournir des données lors du challenge PHM (Pronostics and Heath Management) organisé en 2010 par la société PHM. Dans (Ertunc, H. M., and Oysu, C., 2004), les auteurs ont utilisé un banc d'essai expérimental lié aux tests de durée de vie des outils de perçage pour vérifier leur méthode. Les tests ont été effectués sur une machine MAHO 700S, qui est un centre d'usinage (CNC) à cinq axes, avec un mouvement sur trois axes perpendiculaires et une table tournante/inclinable. Enfin, dans (Ren, Q., et al., 2001), un modèle est proposé, développé et validé par suite pour estimer le taux d'usure des outils d'un tour parallèle conventionnel TUD-50 dans une large gamme de conditions de coupe. Ce qui concerne les pompes, une plateforme a été utilisée dans (Peng, Y. and Dong, M., 2011) pour tester la performance d'une méthode développée de modèle semi-markovien caché pour le pronostic de santé des équipements. La plateforme expérimentale consistait en une véritable pompe hydraulique. Pendant les expériences, des tests d'usure à long terme ont été réalisés. Ensuite, trois pompes ont été usées en les faisant fonctionner avec de l'huile non filtrée. Enfin, des tests sur la charge/décharge des batteries Li-Ion sont rapportés dans (NSF., I/UCRC, 2012) les données concernent l'impédance comme critère d'endommagement, toutes les données ont été fournis par le Centre d'excellence pour les pronostics de la NASA.

La synthèse de ces recherches nous a mené à proposer une approche expérimentale de diagnostic/pronostic en se basant sur un banc d'essai vibratoire qui se décline en 4 phases : Phase de motivation, phase de description du dispositif expérimental, phase de Diagnostic/Pronostic dont les résultats sont discutés et phase de conclusion/perspectives.

À la diversité des approches rencontrées dans la littérature, notre démarche propose préalablement, grâce aux études réalisées, une partie supplémentaire qui décrit l'influence du défaut de balourd sur les systèmes tournants. Cette phase sera se baser sur la détection des données, l'interprétation, l'interpolation et la discussion. Elle propose aussi d'évaluer l'état de santé futur avant la défaillance par une régression d'interpolât des données traitées.

2 DIAGNOSTIC ET PRONOSTIC DU SYSTEME

2.1 Motivation

Le contrôle à base d'analyse vibratoire est un outil puissant de diagnostic/pronostic des modes de défaillance des machines tournantes : elle sert essentiellement à détecter le défaut de balourd, d'alignement et combiné (balourd et désalignement). Ce défaut se caractérise par une fréquence de paramètres essentiels à savoir : déplacement (µm), vitesse (m/s), accélération (m/s^2).

Dans le présent article juste le défaut de balourd qui sera considéré, pour cela, nous optons la technique d'analyse d'accélération. Cette grandeur physique est mesurée par un capteur piézo-électrique placé sur un palier de guidage en rotation de l'arbre.

2.2 Dispositif expérimental

Le banc d'essai vibratoire est un dispositif d'expérimentation (voir Figure. 1) dédiée à tester et valider des approches de détection de défauts de balourd, de diagnostic et de pronostic. L'objectif prioritaire de dispositif vibratoire est de fournir des données expérimentales réelles qui caractérisent la dégradation tout au long de leur vie opérationnelle (jusqu'à leur défaillance totale).

Ce banc d'essai expérimental permet de réaliser les dégradations par le déséquilibrage (qui se traduit par une augmentation de niveau de vibration). Les mesures des vibrations acquises par l'enregistrement se considèrent le point clés de notre étude. Les mesures se font à l'aide d'une sonde de mesure qui est à base d'un matériau piézo-électrique qui permet de convertir les vibrations mécaniques en signaux électriques qui vont être échantillonnés et traités par un logiciel informatique et tracer par suite la représentation temporelle de l'accélération.

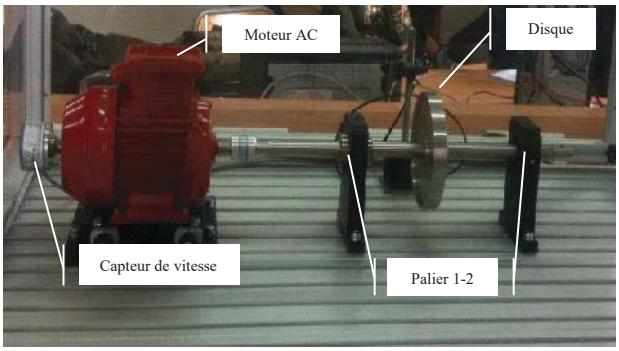


Figure 1: Banc d'essai vibratoire

Le dispositif est composé de trois parties principales : une partie rotative, une partie de génération de dégradation et une partie de mesure et d'acquisition, qui sont détaillées ci-après (voir Figure. 2).

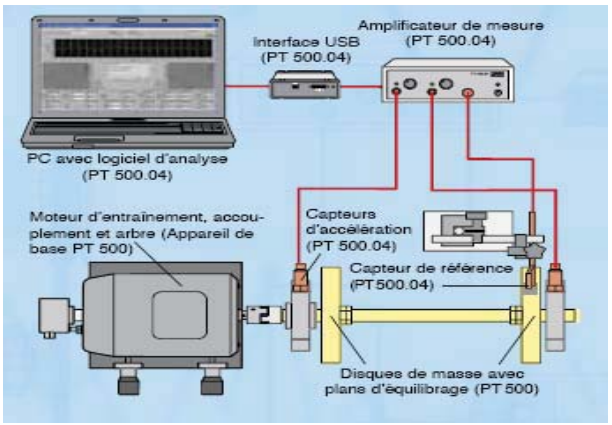


Figure 2: Connexions entre les parties du banc d'essai vibratoire

2.2.1 Partie tournante

Cette partie comprend le moteur électrique (AC), l'arbre et la roue. Le moteur est l'actionneur qui permet la rotation de l'arbre, ce dernier est guidé en rotation par deux paliers. Le moteur a une puissance égale à 250 W, la fréquence de rotation est commandée par un variateur de vitesse en agissant sur le courant d'excitation, ce qui permet au moteur AC d'atteindre sa vitesse nominale de 4000 tr/min sous une tension 110/200 V et un réseau de fréquence 60/50 Hz.

2.2.2 Partie de génération de dégradation

Cette partie comprend un disque en Aluminium de 140 (mm) en diamètre et d'épaisseur 26 (mm), sur lequel ont été réalisé plusieurs trous taraudés débouchant (18 perçages). Le disque est interposé entre les deux paliers, au milieu. Les trous en question ont pour objectif de créer le balourd.

2.2.3 Partie mesure et acquisition

Cette partie permet de mesurer et d'acquérir les vibrations générées par l'équilibre/ déséquilibre. Les mesures sont des grandeurs analogiques acquises à des vitesses de rotations différentes par un accéléromètre piézoélectrique à aimant fixé sur un palier.

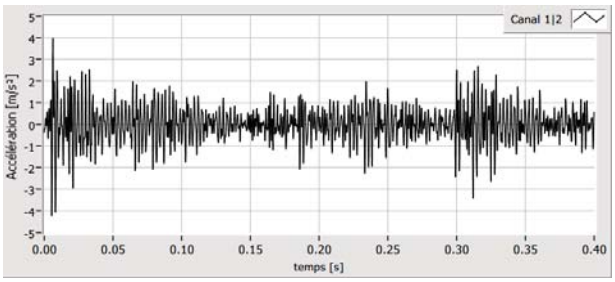
3 DIAGNOSTIC

Cette partie sert à agir sur la vitesse de rotation par l'augmentation du courant d'excitation, comme déjà cité, pour obtenir les résultats d'accélération associé à chaque vitesse : 1000, 1500, 2000, 2500 et 3000 (tr/min) pour deux cas :

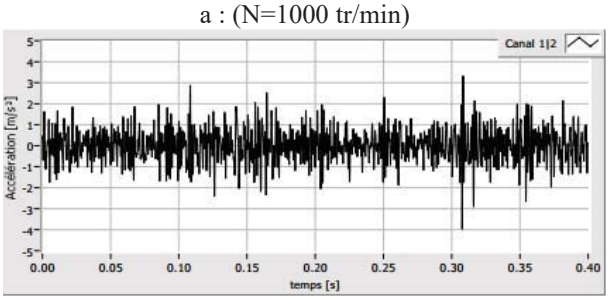
- 1er cas : Cette expérience consiste à travailler avec le banc d'essai sans défaut associé, c'est-à-dire le disque ne représente aucun déséquilibre possible (absence de balourd). Le but de cette expérience est de détecter et interpréter les résultats des vibrations générer en absence de défaut.
- 2eme cas : Cette expérience consiste à déséquilibrer le disque par la fixation d'une masse de 10 (g) afin de décaler le centre de masse du centre géométrique. Ce truc crée un balourd qui favorise des vibrations intenses, ces dernières induisent ensuite à une dégradation remarquable sur le système tout entier.

3.1 Dégradation dans le cas équilibré

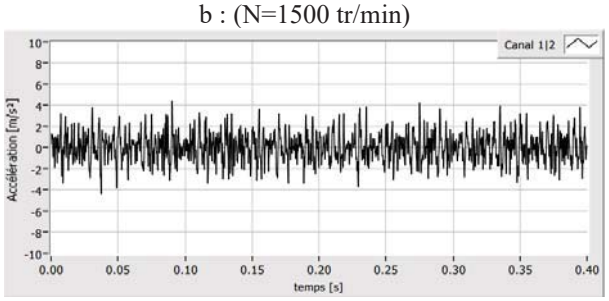
L'objectif de ce test vise à déterminer et à visualiser le comportement vibratoire du système sans défaut. On mesure la valeur de l'accélération efficace pour les différentes vitesses de rotation (voir Figure. 3 : a, b, c, d et e).



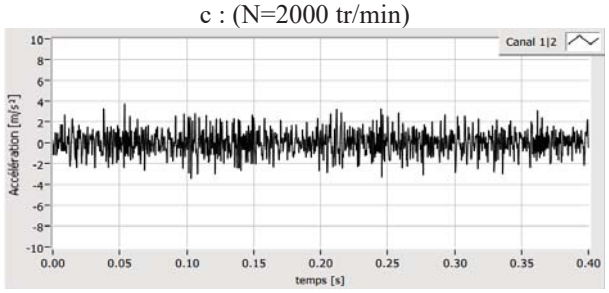
a : (N=1000 tr/min)



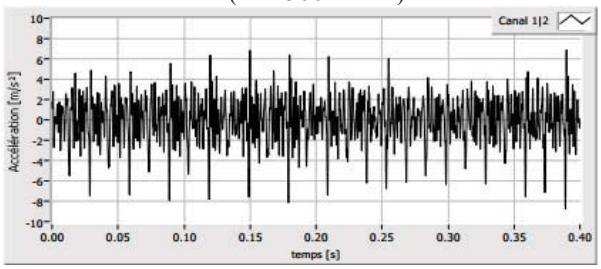
b : (N=1500 tr/min)



c : (N=2000 tr/min)



d : (N=2500 tr/min)



e : (N=3000 tr/min)

Figure 3 : Spectre temporel d'un test équilibré à N (tr/min)

On exploite les résultats précédents et on trace le comportement dans la Figure. 4. Cette dernière montre que l'accélération évolue graduellement si augmente la vitesse de rotation du moteur AC, par conséquent on peut arriver à une accélération énorme. La courbe indique une tendance vers un horizon défaillant.

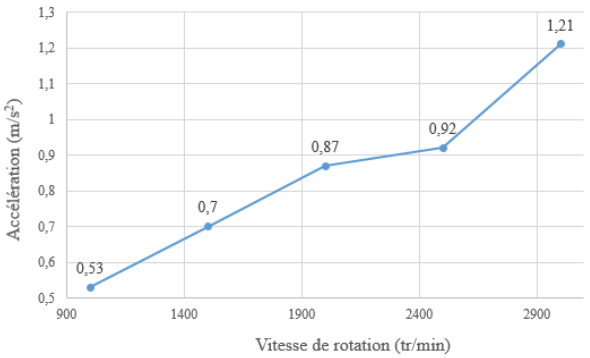
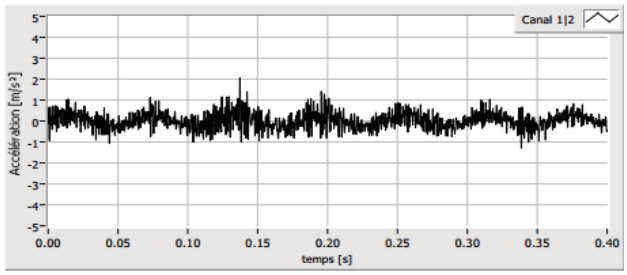


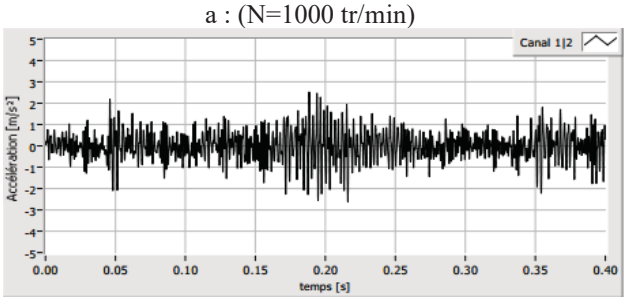
Figure 4 : Evolution de l'accélération (Cas équilibré)

3.2 Dégradation dans le cas déséquilibré

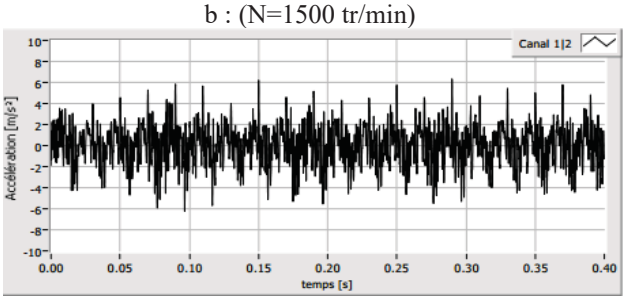
Dans ce cas, on ajoute la masse M sur le disque pour créer un déséquilibre, ce dernier représente le défaut de balourd. Le déséquilibre agit sur le comportement du système en entier, vu à des vibrations. Ce déséquilibre se constate pendant la rotation système ; on l'appelle " balourd dynamique ". Les deux paliers supportant le rotor vont subir à des efforts centrifuges d'une façon alternée.
Les vitesses de rotation retenues sont les mêmes que le test équilibré : 1000, 1500, 2000, 2500 et 3000 (tr/min). On obtient la valeur de l'accélération efficace pour les différentes vitesses de rotation (Figure. 5 : a, b, c, d et e).



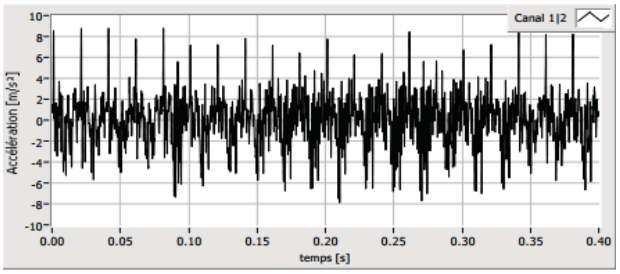
a : (N=1000 tr/min)



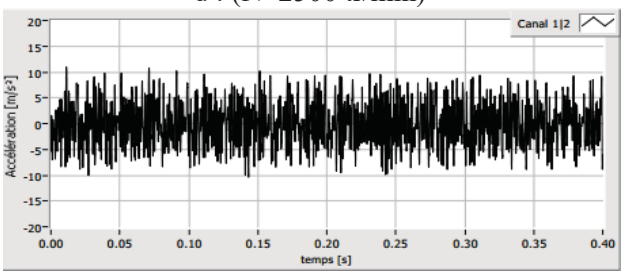
b : (N=1500 tr/min)



c : (N=2000 tr/min)



d : (N=2500 tr/min)



e : (N=3000 tr/min)

Figure 5 : Spectre temporel d'un test déséquilibré à N (tr/min)

L'exploitations des résultats précédents nous donne le tracé du comportement illustré dans la Figure. 6. D'après Cette figure, on constate que l'accélération évolue avec l'augmentation de la vitesse de rotation du moteur AC, par conséquent on peut arriver à une valeur critique, c'est-à-dire que la courbe tend vers un horizon de défaillance.

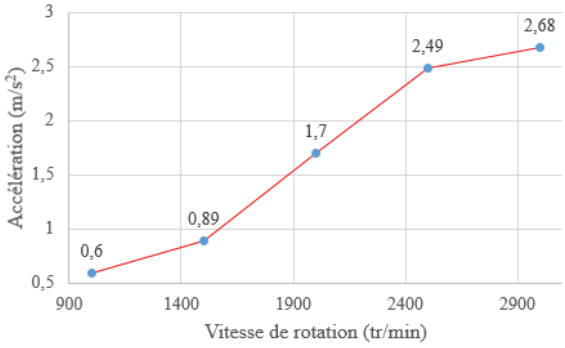


Figure 6 : Evolution de l'accélération (Cas déséquilibré)

3.3 Discussion

Lorsque notre système mécanique est équilibré (sans défauts), juste les faibles vibrations sont générées. Ce phénomène peut justifier par la fatigue de la machine et le jeu à cause de ses composants qui se dégradent au cours de fonctionnement et ses propriétés dynamiques qui varient.
En analysant les résultats, pour le test avec défaut de balourd, nous remarquons que le palier est plus sensible aux excitations et il donne des informations exploitables et significatives.
La Figure. 7, juste après, montre le défaut de balourd, la valeur de l'accélération croît en fonction de la vitesse de rotation, l'augmentation de ses valeurs est importante par rapport au premier test si l'on compare avec les valeurs de référence (sans défaut).

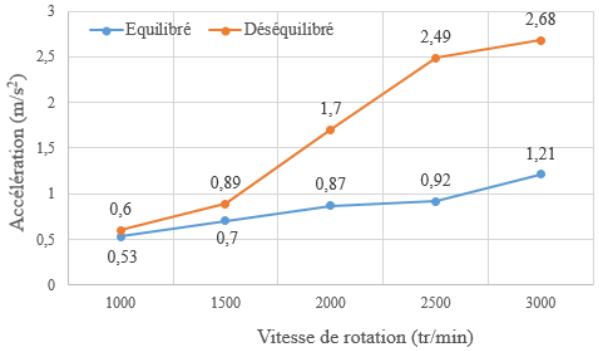


Figure 7 : Comparaison entre les deux tests effectués

4 PRONOSTIC

4.1 Résultats

L'objectif visé par le présent paragraphe est de caractériser le défaut mécanique usuel ou le plus connu, tels que le balourd et de le traduire en une fonction interpolât pour pouvoir le prédire. Pour ce faire, nous avons adopté une procédure expérimentale qui se résume comme suit :
Nous avons exploité les mesures de RMS acquises et traitées par la partie mesure et acquisition avec défaut de balourd à une vitesse de rotation fixée à N=2000 (tr/min). Ensuite, nous avons suivi l'évolution de ce paramètre au cours du temps en prélevant les valeurs de RMS dans des instants aléatoires. Ces valeurs nous a permis de faire une corrélation d'interpolât qui va nous servir après de maitriser l'état de santé futur du système par la prévision d'horizon.
Le tracé du RMS en fonction de temps est outil efficace pour comprendre l'évolution du phénomène de balourd. L'objectif principal est de déterminer à travers des résultats observés expérimentalement, par analyse vibratoire l'influence du balourd sur les différents paramètres vibratoires de notre système pour prédire son état futur.
Le graphe illustré dans la Figure. 8 représente la variation de RMS au cours de temps de fonctionnement avec balourd (m =10 g), mesurée dans des instants aléatoires pour le cas d'une vitesse de rotation constante (N=2000 tr/min).

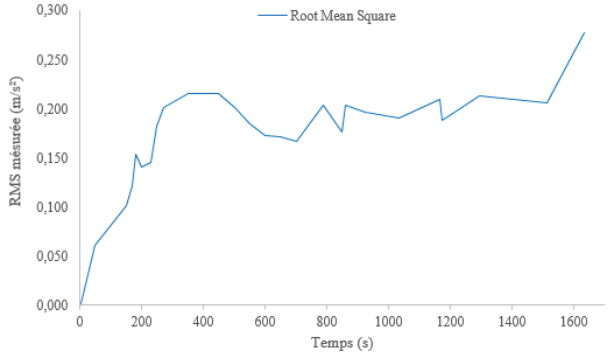


Figure 8 : Tracé des valeurs expérimentales de RMS (m/s^2)

On remarque que l'allure du graphe tracés peut être approximée par une fonction polynomiale de dégrée 6, avec un coefficient de corrélation d'ordre 0,9324, dans ce cas, on peut dire que notre interpolât de corrélation est forte tant qu'il tend vers 1 (voir Figure. 9).

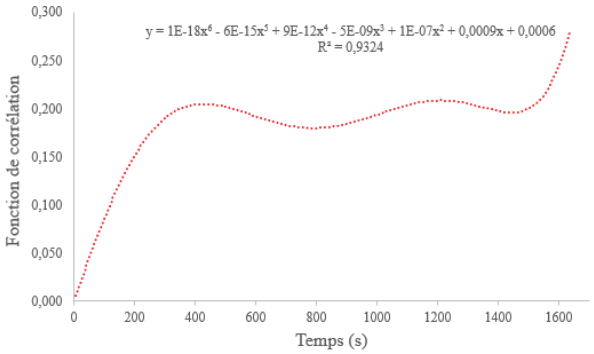


Figure 9 : Tracé de la fonction de corrélation

La Figure. 10 représente deux courbes pour le même système mécanique. La première est celle de la valeur RMS mesurée expérimentalement et la deuxième est celle de la valeur RMS Corrélée. Pour justifier la performance, nous constatons que la valeur de coefficient de corrélation représente une fonction d'approximation significative.

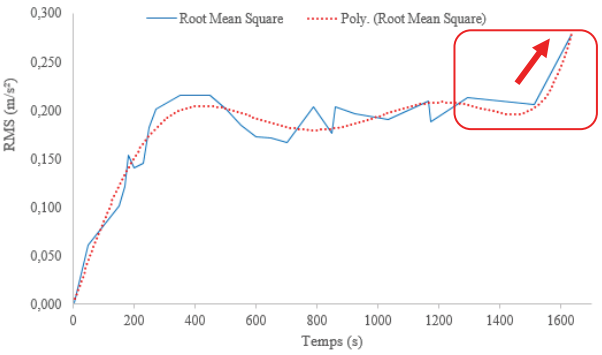


Figure 10 : Comparaison entre les deux résultats (mésuré et corrélé)

4.2 Discussion

L'étude présentée dans cette partie se concerne la prédiction de l'état de santé d'un système vibratoire avec défaut de balourd. Pour ce faire, nous avons adopté la méthode la plus connue et la plus efficace qui se base l'analyse vibratoire. En premier lieu, une détection des résultats expérimentales de la valeur de RMS (voir Figure. 8), à partir des résultats on a tracé la courbe de tendance illustrées dans la Figure. 9, on constate que l'indicateur RMS entraine une tendance vers l'horizon de défaillance car il croît au cours de fonctionnement sous une vitesse de rotation constante (N=2000 tr/min) à partir l'instant 800 s. La courbe de tendance présentée dans la Figure. 9 montre que le balourd a une influence sur l'évolution de l'indicateurs RMS. Par conséquence, le niveau vibratoire augmente dans le cas où le disque n'aura plus une intervention d'équilibrage.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un dispositif expérimental, appelé banc d'essai vibratoire, est présenté dans cet article. Son objectif intrinsèque est de fournir des données expérimentales associées aux dégradations du système avec le défaut de balourd. Ces données sont utilisées par suite pour diagnostiquer et pronostiquer le système vibratoire d'une part, pour tester et vérifier les méthodes de recherche dans les domaines suivants : surveillance des conditions, détection des défauts, vérification et contrôle d'autre part.

La particularité de ce travail est que la dégradation peut être réalisée dans des conditions de fonctionnement aussi bien constantes que variables et que les données sont acquises pendant toute la durée de chaque expérience.
Trois sortes de données expérimentales réalisées :

- Système équilibré avec 5 vitesses de rotation,
- Système déséquilibré (balourd) avec 5 vitesses de rotation,
- Système dégradable (m=10 g) avec une vitesse de rotation constante (N=2000 tr/min),

Enfin, on peut noter que ce travail expérimental sera une piste pour un test avec défaut d'alignement et une combinaison entre les deux défauts associés au système avec un système expert (IA), ensuite, on associe les deux défauts précédents avec le test effectué dans (Nectoux, P., et al., 2012) pour calculer la durée de vie restante du roulement de guidage.

REFERENCES

EL Hannani, A., Refassi, K., EL Maiche, A., Bouamama, M., 2015, « Maintenance prédictive et préventive basée sur l'analyse vibratoires des rotors ». *Laboratoire de Mécanique des Solides et des Structures* ; Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Sidi Bel Abbes.

Ertunc, H. M., and Oysu, C., 2004, "Drill wear monitoring using cutting force signals," *Mechatronics*, vol. 14, pp. 533–548.

Kacprzynski, G., Sarlashkar, A., Roemer, M., Hess, A., and Hardman, W., "Predicting remaining gear life by fusing diagnostics and physics of failure models," *JOM Journal*, vol. 56, no. 3, pp. 29–35, 2004.

Nectoux, P., Gouriveau, R., Medjaher, K., Ramasso, E., Chebel-Morello, B., et al., Jun 2012, "PRONOSTIA: An experimental platform for bearings accelerated degradation tests". *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, PHM'12.,* Denver, Colorado, United States. pp.1-8. hal-00719503.

NSF., I/UCRC Center for Intelligent Maintenance Systems, visited in January 2012, "Prognostic data repository: Bearing data set," in *http://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/pcoe/prognostic-data-repository/.*

Ocak, H., Loparo, K. A., and Discenzo, F. M., 2007, "Online tracking of bearing wear using wavelet packet decomposition and probabilistic modeling: A method for bearing prognostics", *Journal of sound and vibration,* vol. 302, pp. 951-961.

Peng, Y. and Dong, M., 2011, "A prognosis method using age-dependent hidden semi-markov model for equipment health prediction," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 237–252.

Ren, Q., Balazinski, M., Baron, L., and Jemielniak, K., 2001, "Tsk fuzzy modeling for tool wear condition in turning processes: An experimental study," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, no. 2, pp. 260 – 265.

Semma, EL., Mousrij, A., and Gziri, H., Nov. 2014, « Elaboration d'une démarche de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire ». *MOSIM 2014, 10éme Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation,* Nancy, France. Hal-01166665.

Zhou, J., Li, X., Gan, O. P., Han, S., and Ng, W. K., 2006, "Genetic algorithms for feature subset selection in equipment fault diagnostics," *Journal of Engineering asset management*, vol. 10, pp. 1104–1113.

STRATEGIE DE MAINTENANCE OPTIMALE D'UNE STATION DE PANNEAUX SOLAIRES SUR UN HORIZON DE TEMPS FINI

SAFOUANE ELKOUIRI, LAHCEN MIFDAL

Laboratoire d'Innovation Durable et de Recherche Appliquée (LIDRA)
Ecole Polytechnique d'Agadir – Universiapolis
Agadir, Maroc
safouane.elkouiri@e-polytechnique.ma
mifdal@e-polytechnique.ma

SOFIENE DELLAGI

Laboratoire de génie industriel et de production mécanique (LGIPM)
Université de Lorraine Metz, France
sofiene.dellagi@univ-lorraine.fr

ANIS CHELBI

Université de Tunis, Ecole nationale supérieure des ingénieurs de Tunis. CEREP, Tunis, Tunisie
anis.chelbi@planet.tn

RESUME : *L'objectif de ce présent article est de développer une stratégie de maintenance préventive pour un groupe de panneaux solaires interconnectés en série. L'approche consiste à déterminer le nombre optimal de panneaux solaires à remplacer, ainsi que les périodes de remplacement optimales afin de minimiser le coût total de maintenance, et ce, sur un horizon de temps fini. En outre, nous considérons que le remplacement des panneaux solaires améliore la fiabilité du système. En cas de panne, une réparation minimale est effectuée. Cette intervention n'a aucune incidence sur la fiabilité des panneaux solaires. Un exemple numérique est présenté pour illustrer la contribution de l'approche de modélisation proposée et pour discuter les différents résultats obtenus.*

MOTS-CLES : *Stratégie de maintenance, Fiabilité, Remplacement, Réparation minimale, Maintenance préventive, Panneaux solaires.*

1 INTRODUCTION

Ces dernières années, les sujets liés à la réparation et au remplacement des pièces défectueuses ont été étudiés en détail dans la littérature. Le terme de maintenance est devenu une fonction de plus en plus importante dans les entreprises et la recherche scientifique. La plupart de ces études visent à développer des stratégies de maintenance optimales pour améliorer la fiabilité et réduire le coût des réparations et de maintenance préventive. Dans cette perspective, on peut dire que la maintenance ne se limite pas aux actions ordinaires en cas de défaillance, mais doit aider l'entreprise à améliorer la disponibilité du système, à réduire la fréquence des défaillances, à minimiser les coûts de maintenance et les pertes causées par les défaillances. De nombreuses politiques de maintenance ont été proposées dans les ouvrages scientifiques depuis plusieurs décennies, les modèles associés à ces politiques sont basés sur la représentation du moment de l'apparition d'une défaillance.

On distingue deux politiques majeurs de maintenance : politique de type bloc initié par Nakagawa [1] et la politique de type âge développé par Barlow & Proschan [2].

Pour la politique de type bloc, l'élément est remplacé par un autre nouveau, avec une périodicité fixe. Cette action de réparation n'entraîne aucune modification du plan préventif mis en œuvre. L'objectif de cette politique c'est de calculer le nombre optimal d'actions de maintenance préventive (n*), ainsi que la durée optimale entre deux actions (T*) afin de minimiser les coûts de maintenance corrective et préventive. Après quelques années, Nakagawa [3] a présenté des modifications qui prennent en compte deux paramètres T0 (temps de référence) et T* (durée périodique). L'avantage de cette politique est qu'elle est plus facile à gérer, mais avec un inconvénient, elle présente le risque de remplacer des systèmes presque neufs. Une étude approfondie développée par Barlow et Hunter [4] consiste à remplacer l'élément souhaité à une périodicité fixe avec une réparation minimale.

De l'autre côté, nous avons la politique de type âge qui se caractérise par des tailles variées pour les intervalles de temps entre deux actions de maintenance préventive consécutives, l'utilisation de cette politique séquentielle envisage le remplacement de l'élément par un autre neuf soit après l'apparition d'une panne, soit après une période de temps spécifique. Plusieurs études ont été développées par Nakagawa et al [5], et après un an par Ben-Daya et al [6] reposant sur cette politique de maintenance de type âge, en particulier après l'apparition

d'actions de maintenance avec réparation minimale "As Bad As Old" initiées par Barlow et Proschan [2] et de maintenance imparfaite présentée et développée par Wang et Pham [7] ,par exemple une action de maintenance préventive avec remplacement et une action de maintenance corrective avec réparation minimale ou imparfaite. Park et Pham [8] ont proposé un modèle de coût pour les politiques de remplacement en fonction de l'âge et les politiques de remplacement en bloc sous garantie.

La politique suivante suggère une maintenance préventive avec remplacement si seulement si le taux de défaillance a atteint une limite prédéterminée, il existe plusieurs travaux qui traitent la politique de taux de défaillance limite tels que Canfield [9].

En ce qui concerne Gardent et Nonant [10], ont proposé une politique de maintenance basée sur un coût de maintenance limité, cette politique est caractérisée par un coût de réparation estimé, la réparation est effectuée si seulement si le coût estimé est inférieur à une limite prédéterminée, sinon, l'élément défectueux est remplacé.

Au cours des dernières décennies, les énergies renouvelables ont commencé à jouer un rôle important dans la production d'électricité et de chaleur. Les ressources fossiles ne constituent pas une option durable pour l'avenir, car il s'agit de sources d'énergie non renouvelables qui contribuent à la pollution de l'environnement et au changement climatique.

Parmi les sources de production d'énergie renouvelable les plus utilisées figurent l'énergie solaire (panneau solaire photovoltaïque et panneau solaire thermique). Les plus grandes avancées dans le domaine des panneaux solaires ont concerné l'amélioration de la conception des systèmes solaires et l'optimisation de leur fonctionnement et de leur maintenance. Plusieurs études tentent de développer des solutions intégrant le développement durable dans les systèmes solaires, l'une de ces études est réalisée par Qiongjie Dai et al [11] qui présente un système intégré pour améliorer le taux d'utilisation des ressources d'énergie solaire et pour développer une efficacité urbaine durable. Les panneaux solaires photovoltaïques sont généralement à base de silicium et sont utilisés pour convertir le rayonnement solaire en électricité. Les panneaux photovoltaïques les plus populaires sont le silicium monocristallin, le silicium poly-cristallin et le silicium en couche mince appelé silicium amorphe (A-Si).

Concernant l'interconnexion des panneaux photovoltaïques, les schémas largement utilisés dans la littérature sont développés par Lavado Villa et al [12], Ils sont divisés en 4 types de configuration : Parallèle/série (SP), Total Cross Tied (TCT), Honey comb (HC) et Bridge Link (BL).

Les questions liées à la maintenance des systèmes solaires font l'objet d'une attention croissante, comme le prouvent les études et les efforts réalisés par diverses institutions et entreprises pour réduire les coûts de production des systèmes solaires et, en particulier, pour optimiser les coûts de maintenance. Les défaillances survenues dans les panneaux photovoltaïques nous amènent à une réduction de leur efficacité, de leur durabilité et de leur fiabilité. Le diagnostic des performances a été fait par des tests électriques sur chaque panneau, il existe également des études sur l'inspection thermographique dans la littérature. Le progrès technologique permet l'existence de diagnostics non destructifs et même sans contact. Tsanakas et al [13] ont résumé les défaillances des panneaux solaires en trois groupes : dégradation optique, insuffisance électrique et défauts non classés. Une des causes de l'augmentation du taux de dégradation d'un panneau solaire est l'accumulation de saleté et de poussière qui disperse le rayonnement solaire sur le module photovoltaïque. Saidan et al [14] ont étudié l'impact de l'accumulation de poussière sur les modules photovoltaïques, les résultats expérimentaux montrent que la poussière réduit les émissions en fonction de la période d'exposition. La recommandation est de procéder à des opérations de nettoyage pour minimiser l'impact sur la production d'énergie et ainsi maintenir la même puissance sans variations tout au long de la vie des panneaux solaires. Cagnano et De Tuglie [15] proposent un contrôleur décentralisé pour coordonner les injections de puissance réactive des générateurs photovoltaïques afin de contribuer à la régulation de la tension dans les réseaux de distribution, où les actions de contrôle sont évaluées en temps réel en adoptant une méthodologie d'optimisation. D'autres auteurs tels que Jung et al [16] proposent un contrôle configurable, hiérarchique, basé sur un modèle, de l'ordonnancement des dispositifs de contrôle automatisé des générateurs photovoltaïques. Les auteurs comme Torrent-Fontbona et López [17] ont développé une nouvelle planification basée sur la détermination conjointe du nombre de nouveaux panneaux solaires nécessaires, de leur type, de leur emplacement et de leur taille, afin de maximiser l'efficacité de l'installation, de minimiser les pertes du système et d'améliorer les performances de l'installation. On peut citer aussi le travail de Wang et al [18] qui présentent une technique de diagnostic pour localiser les défauts dans les panneaux photovoltaïques, la technique proposée utilise la méthode des données échantillonnées pour estimer les paramètres intrinsèques du panneau.

Ce papier est organisé comme suit : Dans la section suivante, nous précisons la description du problème. Ensuite, les hypothèses de travail et l'élaboration du modèle analytique est décrite dans la section 3. Un exemple numérique est présenté dans la section 4 pour illustrer l'approche de modélisation proposée avec une étude de sensibilité dans la section 5. Enfin, les conclusions et les travaux futurs potentiels sont présentés dans la section 6.

2 DESCRIPTION DU PROBLEME

Dans cette étude, nous allons développer une stratégie optimale de maintenance préventive appliquée à un système de production électrique composé de plusieurs panneaux solaires en série. L'objectif de cette étude est de déterminer le nombre optimal de panneaux à changer ainsi que la périodicité optimale correspondant au nombre de panneaux à changer afin de minimiser le coût total de maintenance.

Plus exactement, la stratégie de maintenance adoptée consiste à remplacer systématiquement un certain nombre de panneaux à partir du nombre total de N panneaux du système à chaque unité de temps T. Les n panneaux remplacés sont différents à chaque fois. Les pannes que le groupe des panneaux peut subir sont généralement des dysfonctionnements, des ruptures de câble ou une mauvaise alimentation électrique. Des actions de maintenance corrective sont effectués sous forme des réparations minimales, ces opérations ne changent pas l'évolution des taux de défaillance. En revanche, les actions de maintenance préventive améliorent le taux de défaillance du système par rapport au nombre de nouveaux panneaux injectés.

(Voir le modèle analytique dans la section 4 ci-dessous).

Nous assistons donc à une stratégie de maintenance préventive de type bloc avec réparation minimale.

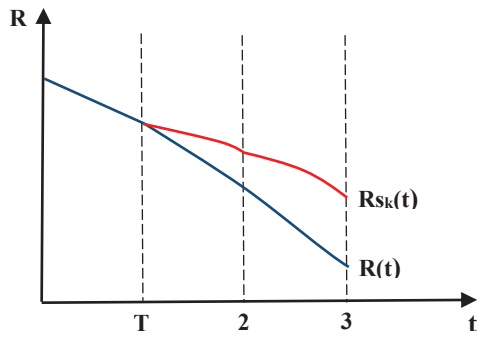


Figure 1 : Evolution de la fiabilité du système étudié

La figure 1 nous permet d'observer l'impact de maintenance sur la fiabilité. La maintenance n'a aucun effet sur la fiabilité du système entre [0, *T*].
À tout moment *T*, la fiabilité du système $Rs_k(t)$ s'améliore (temps de remplacement) par opposition à un système avec $R(t)$ en l'absence d'une stratégie de maintenance préventive.

3 ETUDE ANALYTIQUE

3.1 Hypothèses

Pour développer notre modèle d'optimisation, les hypothèses ci-dessous sont prises en considération :

- Tous les panneaux sont identiques.
- Le système est constitué de (N) panneaux qui fonctionnent en série (structure du système en série).
- Le coût de remplacement préventif d'un panneau et le coût d'une réparation minimale sont connus et constants.
- Les durées des actions de maintenance préventive et de réparation sont négligeables.

3.2 Notations

Données

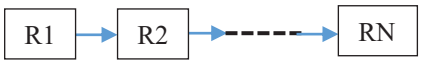
n	: Nombre de panneaux à remplacer à chaque période T
N	: Nombre total des panneaux
H	: Horizon de planification (ut)
MC	: Coût d'une action de réparation minimale du système (um)
CP	: Coût de remplacement préventif d'un panneau (um)
CE	: Coût fixe encouru à chaque action de remplacement préventif (um)
CTM	: Coût total de maintenance (um)
Rs(t)	: Fonction de Fiabilité du système
λs(t)	: Fonction du Taux de défaillance du système
Ent_{inf} [x]	: Partie entière inférieure de x
Ent_{sup} [x]	: Partie entière supérieure de x

Variable de décision

T	: Périodicité de remplacement préventif des panneaux solaires (ut)
n	: Nombre de panneaux à changer à chaque remplacement préventif

3.3 Mise en équation

Dans notre démarche, nous allons déterminer le modèle analytique qui sera utilisé pour minimiser le coût total de maintenance dans le cas où les panneaux sont installés en série (voir figure 2).



Nous rappelons que la fiabilité d'un groupement interconnecté en série est définie par :

$$R_{sys} = \prod R_i(t) \qquad (1)$$

La stratégie de maintenance préventive qui sera développée dans ce chapitre consiste à déterminer à la fois le nombre optimal de panneaux à remplacer (n^*) ainsi que la période optimale de remplacement (T^*) .
Dans cette étude nous avons pu établir un modèle analytique avec un Changement de (m) panneaux à la fin de chaque cycle.

3.3.1 Modèle analytique

Dans ce modèle, on définit un cycle comme étant la durée après laquelle les "N" panneaux auront été remplacés préventivement (*n* panneaux à chaque période *T*). La longueur d'un cycle est donnée comme suit : $\left(Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]\times T\right)$ Ainsi, sur l'horizon H, le nombre des cycles est égal à : $\left(Ent_{\inf}\left[\frac{H}{Ent_{\inf}\left[\frac{N}{n}\right]\times T}\right]\right)$ cycles.

Pour que le cycle finit par le changement de tous les N panneaux, le nombre de panneaux à remplacer à la fin du cycle de ce modèle est défini par :

$$m = n - \left(N - \left(Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right] - 1\right)\times n\right) \qquad (2)$$

En général, on ne finira pas forcément pile sur l'horizon fini H. Ceci parce que le ratio $\left(\frac{H}{Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]\times T}\right)$ n'est pas forcément un entier. Il faut donc intégrer un cycle complémentaire D_{cycle}, qui est défini comme suit :

$$D_{cycle} = H - \left(Ent_{\inf}\left[\frac{H}{Ent_{\inf}\left[\frac{N}{n}\right]\times T}\right]\right)\times Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]\times T$$

Si seulement si :

$$Ent_{\inf}\left[\frac{H}{Ent_{\inf}\left[\frac{N}{n}\right]\times T}\right] \neq \left[\frac{H}{Ent_{\inf}\left[\frac{N}{n}\right]\times T}\right]$$

Sinon $D_{cycle} = 0$.

La figure ci-dessous illustre la politique qui est adoptée pour ce premier modèle.

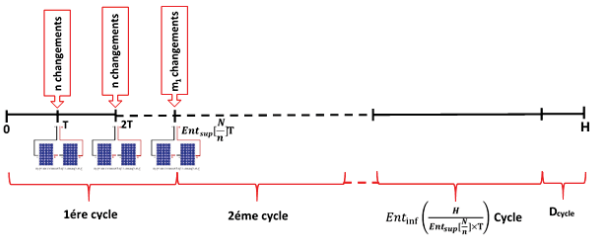


Figure 2 : Politique de changement du modèle analytique

Il faut préciser que pour ce modèle, le nombre de période par cycle est défini par l'équation suivant : $Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]$

- L'expression de la fonction de fiabilité du système

Prenons par exemple "k" indice des périodes par cycle (k=0,….3) , "N" le nombre des panneaux (N=5) et qu'à chaque MP, on remplace n panneaux différents (*n*=2). Sauf à la dernière date $\left(Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]\times T\right)$, on remplace m panneaux restant $(m=1)$ dans ce cas. Donc La fonction de fiabilité du système pour chaque période peut être écrite ainsi :

k=0 [0, T] : $Rs_0(t) = R(t)^5$

k=1, n=2 [T, 2T] : $Rs_1(t) = R(t-T)^2 \times R(t)^3$

k=2, n=2 [2T, 3T] : $Rs_2(t) = R(t-T)^2 \times R(t-2T)^2 \times R(t)^1$

k= $Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]$ =3, m=1 [3T, 4T] :

$Rs_3(t) = R(t-T)^2 \times R(t-2T)^2 \times R(t-3T)^1$

Donc, d'une façon générale, la fiabilité du système s'écrit sous la forme :

$$Rs_k(t) = \prod_{k=0}^{Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]} R_i(t-kT)^{\left(n-(N-(k-1)\times n\times\left(Ent_{\inf}\left[\frac{H}{Ent_{\inf}\left[\frac{N}{n}\right]+1}\right]\right)\right)\times Min[k,1]} \times R(t)^{Max[N-k\times n,0]} \qquad (3)$$

- La fonction du Taux de défaillance du système

Nous rappelons que la fonction du taux de défaillance s'écrit comme suit :

$$\lambda s_k(t) = \frac{-\frac{d(Rs_k(t))}{dt}}{Rs_k(t)} \quad (4)$$

- Le coût total de maintenance CTM

Rappelons que "k" indice des périodes par cycle (k=0,….3) , le nombre des panneaux (N=5), et qu'à chaque MP, on remplace (n=2) panneaux différents, sauf la dernière date $\left(Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]\times T\right)$, on remplace m panneaux restant $(m=1)$ dans ce cas. Donc le coût de maintenance pour chaque intervalle est donné sous la forme suivante :

k=0 [0, T] : $C_0(t) = Mc \times \int_0^T \lambda s_0(t)dt$

k=1, n=2 [T, 2T] : $C_1(t) = Mc \times \int_T^{2T} \lambda s_1(t)dt + (2CP + CE)$

k=2, n=2 [2T, 3T] : $C_2(t) = Mc \times \int_{2T}^{3T} \lambda s_2(t)dt + (2CP + CE)$

k= $Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]$ =3, m=1 [3T, 4T] :

$C_3(t) = Mc \times \int_{3T}^{4T} \lambda s_3(t)dt + (2CP + CE)$

Nous pouvons donc exprimer le coût $C_k(t)$ dans un intervalle allant de kT à (k+1)*T comme suit :

$$C_k(t) = Mc \times \int_{k\times T}^{(k+1)T} \lambda s_k(t)dt + (n-(N-(k-1)\times n) \times \left(Ent_{\inf}\left[\frac{k}{Ent_{\inf}\left[\frac{N}{n}\right]+1}\right]\right) \times Min[k,1] \times CP + CE) \quad (5)$$

Nous pouvons alors exprimer le coût total de maintenance sur tout l'horizon du temps fini H, sous la forme suivante :

$$CTM(t) = \left(Ent_{\inf}\left[\frac{H}{Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]\times T}\right] \times \left(\sum_{k=0}^{Ent_{\sup}\left[\frac{N}{n}\right]} C_k(t)\right)\right) + \sum_{k=1}^{Ent_{\inf}\left[\frac{Dcycle}{T}\right]} C_k(t) + Mc \times \int_{Ent_{\inf}\left[\frac{Dcycle}{T}\right]\times T}^{\left[\frac{Dcycle}{T}\right]T} \lambda s_{Ent_{\inf}\frac{Dcycle}{T}}(t)dt \quad (6)$$

4 ETUDE NUMERIQUE

4.1 Données numériques

Dans ce paragraphe, une étude numérique sera utilisée pour illustrer le scénario proposé dans la première partie. Le logiciel MATHEMATICA® a été utilisé pour déterminer le temps optimal (T*) et le nombre optimal de remplacement (n*) avec un coût de maintenance minimal.

N	: 10
R(t)	: $e^{-(\frac{1}{7})t}$
H (ut)	: 70
Mc (um)	: 2000
CP (um)	: 400
CE (um)	: 150

Tableau 1 : Données numériques

4.2 Résultat numérique

Les résultats de cette étude sont exprimés suivant un tableau résumant les valeurs nécessaires pour mieux comprendre le comportement de notre stratégie.

4.2.1 Résultat du modèle analytique

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus en utilisant le premier modèle.

N=10					
Nb de panneaux changés	Nb de MP	Coût de réparation Mc (um)	Coût du MP	CTM (um)	T*
1	17	1,209.10^6	9500	1,218.10^6	4
2	7	709 714	6800	716 514	9
3	7	586 287	9200	595 487	9
4	5	493 714	8100	501 814	12
5	3	437 143	6600	443 743	18
6	3	390 857	6200	397 057	18
7	3	421 714	7800	429 514	18
8	3	452 572	9400	461 972	18
9	3	483 486	11 000	494 486	18
10	2	549 571	8600	558 171	24

Tableau 2 : Résultats numériques obtenus selon le modèle analytique

D'après le tableau 2, nous pouvons constater que la solution optimale pour notre modèle est ((*n*=6) qui consiste à changer **6 panneaux** à chaque date *T**=18mois sauf qu'à la date finale du changement (m=4), c'est-à-dire changer 4 panneaux.

La figure ci-dessous décrit l'évolution du coût total de maintenance en fonction du nombre des panneaux à changer à chaque maintenance préventive.

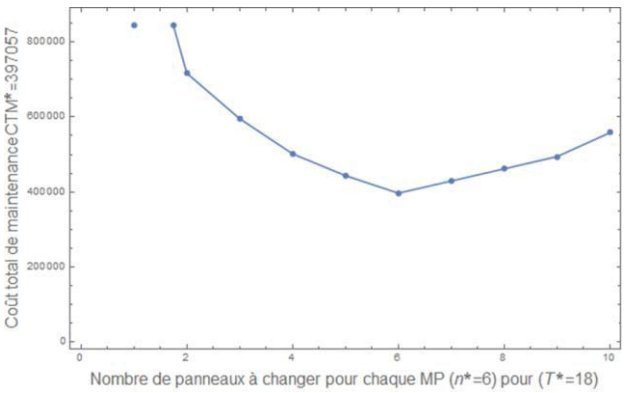


Figure 3 : CTM en fonction de nombre de panneaux à changer

Nous constatons que le nombre optimal de panneaux à changer pour chaque intervention préventive est égale à six (n=6), pour une périodicité optimale de remplacement qui est égale à dix-huit mois (T=18) avec un coût total de maintenance minimale CTM=397 057 um.

5 ETUDE DE SENSIBILITE

5.1 Etude de sensibilité basée sur la variation du Coût de remplacement CP

La première étude de sensibilité se base sur la variation du coût de maintenance préventive pour illustrer son effet sur le comportement de la périodicité optimale de remplacement T*.

Le tableau suivant illustre les résultats de cette étude.

N=10, N=4				
CP (Um)	CE (Um)	MC (Um)	CTM (Um)	T* (mois)
200	150	2000	498 214	12
400	150	2000	501 814	12
1000	150	2000	512 614	12
5000	150	2000	584 614	12
10 000	150	2000	663 607	15
12 000	150	2000	691 607	15
15 000	150	2000	727 600	18
20 000	150	2000	777 600	18

Tableau 3 : Périodicité optimale de la MP avec variation du coût CP

Dans le tableau 3, nous remarquons que lorsqu'on augmente le coût de remplacement préventif, la périodicité d'intervention préventive T* augmente, donc il vaut mieux de faire moins de maintenance préventive.

5.2 Etude de sensibilité basée sur la variation du coût de réparation minimale MC

Dans cette partie de notre étude, nous mettons l'accent sur le coût de la réparation minimale MC, pour illustrer son effet sur le comportement de la périodicité optimale de remplacement T*.

N=10, N=4				
CP (Um)	CE (Um)	MC (Um)	CTM (Um)	T*(mois)
400	150	20	10 370	18
400	150	50	19 025	18
400	150	100	32 492	15
400	150	120	37 721	15
400	150	200	57 471	12
400	150	1000	254 957	12
400	150	2000	501 814	12
400	150	5000	$1{,}24.10^6$	12

Tableau 4 : Périodicité optimale de la MP avec variation du coût MC

Dans le tableau 4, on remarque que lorsqu'on augmente le coût des actions de maintenance corrective MC, la périodicité de remplacement préventive diminue, ce qui est logique. Donc il vaut mieux de faire plus de maintenance préventive.

5.3 Etude de sensibilité basée sur la variation du taux de panne

Dans cette partie, nous allons faire une variation du taux de panne pour montrer son effet sur le comportement de la périodicité optimale de remplacement T*.
Le tableau ci-dessous illustre les résultats de cette étude.

N=10, N=4				
CP (Um)	MC (Um)	Taux de panne λs (mois^{-1})	CTM(Um)	T*
400	2000	1/600	11 733	18
400	2000	1/400	15 230	18
400	2000	1/250	21 299	15
400	2000	1/200	24 955	15
400	2000	1/100	43 038	12
400	2000	1/7	501 814	12
400	2000	1/2	$1.7361.10^6$	12

Tableau 5 : Périodicité optimale de la MP avec variation du taux de panne

Dans le tableau 5, on remarque que lorsqu'on augmente le taux de panne, la périodicité de remplacement préventive diminue, ce qui est totalement logique. Donc il vaut mieux de faire plus de maintenance préventive.

Nous pouvons donc illustrer la synthèse de l'étude de sensibilité comme suit :

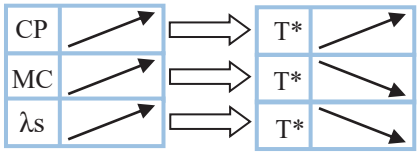


Figure 4 : Synthèse de l'étude de sensibilité

6 CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons développé une stratégie de maintenance préventive pour un groupement de plusieurs panneaux photovoltaïques interconnectés en série, afin de minimiser le coût total de maintenance. La stratégie de maintenance utilisée doit déterminer le nombre optimal de panneaux à changer ainsi que la périodicité optimale correspondant au nombre de panneaux à changer sur un horizon de temps limité. L'horizon fini est divisé en périodes égales.

Un modèle mathématique a été développé avec un nombre de cycle et un nombre de panneaux à changer, afin d'obtenir un calendrier de maintenance préventive en minimisant le coût total de maintenance.
L'approche de modélisation proposée a été illustrée sous forme d'un exemple numérique, avec une étude de sensibilité par rapport au coût des données numériques, afin de montrer l'impact de la variation du lissage des paramètres sur la solution obtenue.
Cette analyse a permis d'identifier un ensemble de situations problématiques possibles que les professionnels peuvent trouver dans l'application des modèles d'optimisation de la maintenance et des solutions correspondantes. Les difficultés liées à la mise en œuvre des modèles de maintenance sont un sujet qui a reçu peu d'attention dans la littérature. La proposition de cette solution a été partagée pour aider les entreprises d'énergie solaire à créer les conditions nécessaires aux études de fiabilité et à la mise en œuvre d'un système rentable et efficace appliqué aux modèles de maintenance. Par conséquent, ce document aide à réduire au minimum l'écart identifié dans la littérature entre la théorie et la pratique.

Des extensions de ce travail sont envisagées. L'une d'entre elles consiste à étudier des situations plus réalistes dans lesquelles les actions de maintenance préventive sont imparfaites avec des durées non négligeables de maintenance. Une autre extension de ce travail consisterait à tester d'autres types d'associations entre panneaux solaires, comme l'association parallèle et l'association série-parallèle. Des expressions plus générales devraient être étudiées de manière empirique et analytique.

REFERENCES

[1] T. Nakagawa, «Optimum policies when preventive maintenance is imperfect,» pp. pp: 331-332, 1979.

[2] R. E. Barlow et F. Proschan, Mathematical theory of reliability, John Wiley sons,, 1965.

[3] T. Nakagawa, «A summary of periodic replacement with minimal repair at failure,» *Journal of the Operations Research Society of Japan,* 1981.

[4] R. Barlow et L. Hunter, «Optimum preventive maintenance policies,» *Operations research,* pp. :90-100, 1960.

[5] T. Nakagawa, X. Zhao et W. Young Yun, «Optimal age replacement and inspection policies with random failure and replacement times,» *International Journal of Reliability ,Quality and Safety Engineering,* pp. 405-416, 2011.

[6] M. Ben-Daya, s. O. Duffuaa et Abdul Raouf, «Maintenance, modeling and optimization,» *Springer Science & Business Media,* 2012.

[7] H. Wang et H. Pham, «Optimal age-dependent preventive maintenance policies with imperfect maintenance,» *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering,* pp. :119-135, 1996.

[8] M. Park et H. Pham, «Cost models for age replacement policies and block replacement policies under warranty,» *Applied Mathematical Modelling,* pp. :5689-5702, 2016.

[9] R. V. Canfield, «Cost optimization of periodic preventive maintenance,» *IEEE Transactions on Reliability,* pp. :78-81, 1986.

[10] P. G. a. L. Nonant, «Entretien et renouvellement d'un parc de machines,» *Revue Française de Recherche Opérationnelle,* vol. vol. 7, pp. 5-19, 1963.

[11] Q. Dai, «Optimal Photovoltaic/Battery Energy Storage/Electric Vehicle Charging Station Design Based on Multi-Agent Particle Swarm Optimization Algorithm,» *MDPI journals/sustainability,* 2019.

[12] L. F. Villa et Lavado, «Maximizing the power output of partially shaded photovoltaic plants through optimization of the interconnections among its modules,» *IEEE J.Photovoltaics,* vol. 2, p. 154–163, 2012.

[13] Tsanakas, «Faults and infrared thermographic diagnosis in operating c-Si photovoltaic modules,» *a review of research and future challenges, Renew. Sustain. Energy Rev,* p. 695–709, 2016.

[14] M. Saidan, A. Albaali, E. Alasis et Kaldellis, «Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment,» p. 499–505, 2016.

[15] A. Cagnano et E. De Tuglie, «A decentralized voltage controller involving PV generators based on Lyapunov theory,» *Renewal. Energy 86,* p. 664–674, 2016.

[16] J. Jung, A. Onen, K. Rusell et R. Broadwater, «Configurable,hierarchical, model-based, scheduling control with photovoltaic generators in power distribution circuits,» . *Renew. Energy 76,* p. 318–329, 2015.

[17] F. Torrent-Fontbona et B. López, «Decision support for grid-connected renewable energy generators planning,» *Energy,* p. 577–590, 2016.

[18] W. Wang, L. A. Ch-F, H.-H. Chung et R. Lau, «Fault diagnosis of photovoltaic panels using dynamic current-voltage characteristics,» *IEEE Trans. Power Electron. 31 (2),,* p. 1588–1599, 2016.

13th *International Conference on Modeling, Optimization and Simuation* - MOSIM*'20 - November 12-14, 2020*
Agadir - Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

Risk and decision analysis for Reconfigurable Assembly System Design under uncertainties

Amélie BEAUVILLE DIT EYNAUD, Nathalie KLEMENT, Lionel ROUCOULES, Olivier GIBARU **Laurent DURVILLE**

Arts et Métiers Institute of Technology, LISPEN
HESAM Université
8 boulevard Louis XIV, 59046 Lille, France
amelie.beauville-dit-eynaud@ensam.eu
nathalie.klement@ensam.eu

Groupe PSA
Route de Gisy
78943 Vélizy-Villacoublay
France

ABSTRACT: *To face the variable demand of the market, modular and mobile equipment are integrated on production lines. Previous works proposed design and evaluation methodologies to build reconfigurable production systems. However, taking the right decision concerning investments and the choice of equipment may be complex. In this paper, we present Reconfigurable Assembly Systems design from a risk and decision analysis perspective to support decision making. Market demand scenarios are associated with occurrence probabilities. A decision tree represents consecutive scenarios, for which the decision maker is proposed to make a choice regarding investments for the assembly line. The utility function is computed based on the decision maker's attitude to risk evaluated by equivalent lotteries. The objective function computing the final score of a scenario and a decision covers investments, reconfigurability rate, performance of the system and maturity of technological bricks. Implications of early investments towards reconfigurability can be identified. The approach is applied on a real use case from the automotive industry.*

KEYWORDS: *Changeability, Reconfigurability, Reconfigurable Assembly System, Decision Support Tool, Decision analysis*

1 INTRODUCTION

To face a volatile and unpredictable customer demand, developments of a new generation of production systems, Reconfigurable Manufacturing and Assembly Systems (RMS and RAS), have been carried out. (Koren et al., 1999) formalized the paradigm of reconfigurability in production systems, and defined six core characteristics of production systems: scalability, modularity, integrability, customisation, convertibility and diagnosability.

Fluctuations of the market imply the need of a production system able to follow changes in terms of product type or production volume. Depending on the economical context, companies need to quickly configure and set adjustment parameters of the system. In order to achieve these quick changes, RMS and RAS integrate modular tools and machines, and easily movable equipment (Beauville dit Eynaud et al., 2018). An important point is also to integrate consideration of changeability at early stages of production system development (Andersen et al., 2017). Companies are not familiar with changeable systems and research works focus on supporting the industry in the process of RMS integration. Furthermore, decision makers struggle with the evaluation of new generation PS on criteria which are hardly comparable on a same scale. Indeed, the comparison of performance metrics with reconfigurability indicators is questionable. We aim to support RMS Design by answering the question of how to invest and adjust in the best way the production system.

During the PS life-cycle, the economical context will change. In this paper, the demand is modeled by scenarios, representing a period of time corresponding to a market requirement, for which a configuration has to be selected. In the proposed Reconfigurable Production System Design Problem (RPSDP), consecutive scenarios are considered, and implications of early decisions in a previous scenario are taken into account in next scenarios. In this paper, a "scenario" corresponds to the succession of a decision step followed by a market evolution (event). The problem to solve is the choice to invest or not in a new resource for each time period, without knowing with certainty how the market will change.

Section 2 of this paper presents a literature review on

decision problems in reconfigurable production systems design, and a the state of the art on risk decision analysis. The proposed method applied on a case study is detailed in Section 3. Finally, a conclusion of this approach and further research steps are presented in Section 4.

2 STATE OF THE ART

2.1 Decisions in reconfigurable production systems design

Previous research focused on providing support tools for companies to choose appropriate resources and PS configuration in the design process. (Andersen et al., 2017) and (Beauville dit Eynaud et al., 2020) proposed RMS/RAS design methodologies, covering design steps from needs identification to final decision.

In order to support the design process, reconfigurability metrics have been investigated and developed based on the six core characteristics of reconfigurability (Wang et al., 2017; Rösiö et al. 2019; Beauville dit Eynaud et al., 2020). In particular, (Beauville dit Eynaud et al., 2020) defined quantitative metrics for reconfigurability evaluation, and compared obtained metrics with performance indicators evaluated by Discrete Event Simulation (DES). Results are then made available on a dashboard for the decision maker.

However, during the design procedure, the company needs to evaluate various technical solutions (for example fixed, movable or mobile robots), several layout configurations, and different demand scenarios. Then, based on metrics evaluated for all these cases, a decision has to be taken. The decision maker faces many indicators with a complex imbrication: if a technology has been adopted in a first investment step, this decision will have consequences on investment decisions in the next steps, that is to say in the next scenarios. The problem can be modeled using a tree structure, where each node corresponds to an investment decision or to an event (market change).

2.2 Risk decision analysis

Decision analysis supports judgement in the case of complex, multi-criteria and multi-stages scenarios. It enables an objective, mathematical-based decision instead of a bias-distorted decision when conducted without methodology (Tversky and Kahneman, 1974). Risk decision analysis covers the study of alternatives, influences between parameters and their prioritisation. The scope of decision analysis is wide and covers the economic sphere, risk analysis in engineering, medicine, etc.

In the domain of floating production storage and offloading units, (Lassagne, 2000) studied the impact of the integration of risk-reduction measures on offshore installations on both technical and economical sides.

In the automotive sector, (Tchoffa et al., 2012) applied decision analysis on the management of industrial incidents. Authors are able to evaluate the impact of the different incident causes, their interrelations and their probabilities of occurrence.

The methodology to model a decision problem in an uncertain environment is the following (Clemen and Reilly, 2013): 1. Identification of the situation and objectives ; 2. Identification of alternatives ; 3. Problem modeling ; 4. Determination of the best alternative ; 5. Sensitivity analysis.

The decision maker's attitude to risk is evaluated based on equivalent lotteries which enables to define the utility function. The principle of an equivalent lottery is to give the choice between two lotteries: for example, winning a high gain with 10 % chance and not winning at all with 90 % chance, or winning a small gain with 50 % chance. If the decision maker chooses the second lottery, he is risk-averse. In the case of conflicting objectives, the equivalent lotteries also support the definition of the multi-attribute utility function based on the company's priorities.

In the problem modeling step, an influence diagram is built to represent in a formal way decisions, uncertainties, values and inferences. It is an oriented acyclic graph with decision nodes and value nodes (deterministic nodes) (Clemen and Reilly, 2013). The influence diagram is an extension of Bayesian networks, as the nodes of the graph correspond to probability distributions and arcs between nodes to dependencies between those distributions. The decision tree is then built to represent the sequentiality of decisions and events in an explicit way. A decision tree is an oriented graph with uncertainty nodes, decision nodes and terminal nodes.

The resolution process is decomposed in two steps, with the objective to maximise the expected value of the profit (Goodwin, 2004). Using the decision tree, in the roll-forward step, the final payoffs of each alternative, corresponding to a branch of the decision tree, are calculated. Then, the rollback step consists in the computing of the profit value for each terminal node. The chosen decisions are the ones with the highest expected values.

2.3 Conclusion of the literature review

In a volatile environment, taking objective decisions regarding investments is complex. Furthermore, decision makers can be influenced by a bias regarding new technologies: mistrust or on the contrary blind trust.

The industry needs a decision support tool for the design of RMSs and RASs. Previous works fixed design methodologies and evaluation criteria to help design and rating of the integration of new technological solutions or configurations of the production system. However, the quantity of parameters to take into account while conceiving a manufacturing system (performance, reconfigurability, and costs metrics) makes the decision process complex. In addition, it is complex to have a clear overview of consequences of consecutive decisions over scenarios. By modeling uncertainty about future market trends, it is possible to simulate the system evolution following consecutive decisions.

Decision makers need an overview over market demand scenarios supporting multi-criteria evaluation of decisions.

3 DECISION ANALYSIS FOR RAS DESIGN

3.1 Case study: Multi-product assembly line

The case study is a multi-product engine assembly line in the automotive industry, facing a varying demand in both product mix and volume. To face changing market requirements, the new strategy of the company is to transform its production system into a RAS. However, taking decisions in this context is complex. Indeed, decision makers are not familiar with the new reconfigurable equipment, and in addition, the production system seeks contrary goals: being efficient, as well as rapidly reconfigurable and economically interesting.

The objective is to maximise the utilisation rate of machines, minimise investments and maximise reconfigurability of the system.

Alternatives offered to the decision-maker are, at the beginning of each scenario, to choose to invest in a new resource, or to abstain from investing. Each resource type has a different price, reconfigurability rate and utilisation rate. This last parameter is determined by running the same scenarios in a DES software, enabling assessment of the performance of the production system with the new machine. The price of resources is also known, and the reconfigurability metric of each resource is computed by means of the formula defined in (Beauville dit Eynaud et al., 2020), based on reconfigurability characteristics defined by (Koren et al., 1999).

In this study, we propose two scenarios for the variations of the market demand: an increase and a decrease of the demand.

3.2 Model

The approach is implemented in the decision analysis software Decision Programming Language (DPL9) developed by Syncopation. Utility functions of the attributes are determined by equivalent lotteries generated with ASSESS tool. The user indicates the attributes (decision parameters) of the problem, boundary values, and the tool supports the determination of the multi-attribute utility function. In this problem, the four attributes are the investment level, the machine utilisation rate, the reconfigurability indicator and the maturity indicator. The maturity metric depicts the level or readiness of the proposed technological bricks. The global utility function is built based on (Keeney, 1974).

Figure 1 depicts the influence diagram modeled in DPL9. Two scenarios are represented. The squares correspond to decision nodes, ovals to chance nodes (events) and squares with rounded edges are value nodes. Arrows between nodes represent influences between them. The model includes two consecutive scenarios, called Period 1 and Period 2. At the beginning of a time period, a decision regarding purchasing of new resources is taken by the company. This event corresponds to the yellow decision nodes. The choice has consequences on investments, the reconfigurability level of the production line, the maturity of the line after installation of the purchase of new resources, and the machine utilisation rate. Then, a scenario run is materialized by the realisation of a market evolution (green chance nodes). The market demand impacts the facility utilisation rate. The market evolution of the first scenario impacts the investment strategy choice of the second scenario.

The decision tree of the problem is symmetric. The four decision alternatives are illustrated Figure 2: no investment (no action), add a fixed robot, add a movable robot, or add a mobile robot.

A chance node can lead to four possibilities: strong market decrease, low decrease, low increase or strong increase of the demand. Percentages of each alternative are fixed and defined before running the simulation. They are set depending on the fluctuation trend the scenario aims to model. This fluctuation trend may be realistic and based on company's data or can be set to test a scenario designed with theoretic values. In the first scenario, depicting a rise of the market demand, the probability of strong decrease is 0 %, the probability of low decrease as well as low increase are 40 %, and the probability to face a strong increase is 20 %. The second scenario simulates a decline of the demand, and is modeled by a 70 % chance of strong market decrease, 30 % chance of low decrease and 0 % of chance of increase (for both low and strong possibilities).

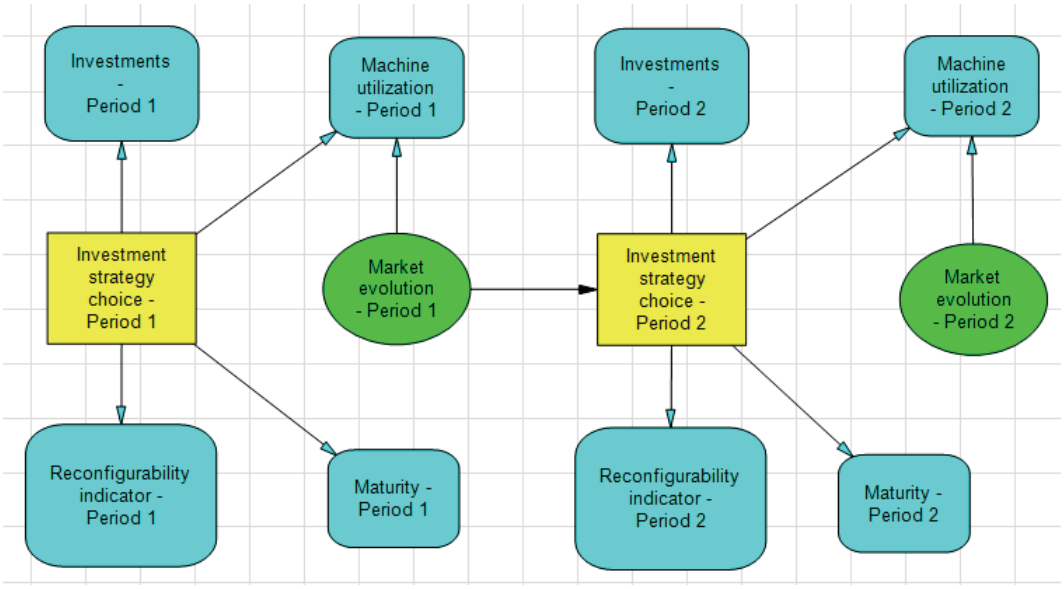


Figure 1 – Influence diagram (DPL9)

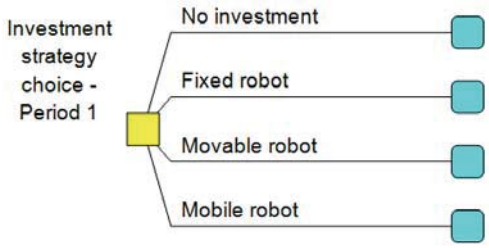


Figure 2 – Decision node (DPL9)

3.3 Results

The resolution is based on the maximisation of the expected value. The first step of the resolution is called roll-forward, where the sum of consequences of end-choices is computed for each branch of the decision tree (Goodwin, 2004). Then, in the rollback step, the expected value is calculated for each decision node, and alternatives corresponding to the highest expected values are selected.

Figure 3 presents an extract of the decision tree after DPL9 simulation. Considering given probability distributions, the multi-attribute utility function is maximised when a movable robot is added to the system in the first time period, and when no investments are done in the second period.

Indeed, in the first scenario, the market evolution is uncertain and is likely to increase or decrease. This explains why it is relevant to integrate on the line a resource which can be easily added or removed. In the second period however, a decrease is certain, and it is preferable not to increase unnecessarily the capacity of the system.

In a second step, a sensitivity analysis is conducted to verify the robustness of the solution regarding input parameters. In this paper, we propose to conduct a sensitivity analysis on the maturity indicator of the mobile robot. For now, the value of this metric is $M_R = 0.48$. The hypothesis we want to verify is if the increase of M_R has an impact on the final decision proposed by DPL9. Figure 4 shows the results of the sensitivity analysis. The abscissa corresponds to the value of M_R for the mobile robot, and the ordinate is the expected value. From this graph, we can read that above a value of 0.6 for the maturity index, there is a policy change in the model, and the solution "mobile robot" will be preferred. This means that after a rise of the maturity of the mobile robot, due to the enhancement of the technology, and the update of the maturity indicator, the decision support tool encourages to add a mobile robot instead of a movable one on the line, for the same input parameters regarding evolution of the market.

3.4 Discussion

The contribution of decision analysis for RMS/RAS design concerns decision support in an industrial context where companies are divided between the urge to integrate new components to have state-of-the-art production facilities, but are limited by the high price of flexible solutions. We propose a new approach to enable statistically-based objective decision in an uncertain environment.

The specificity encountered when designing a reconfigurable system is the inability to predict sales exactly and the need to assess the transformability potential of the line. Thus, expected production volumes and product mix can be formulated as scenar-

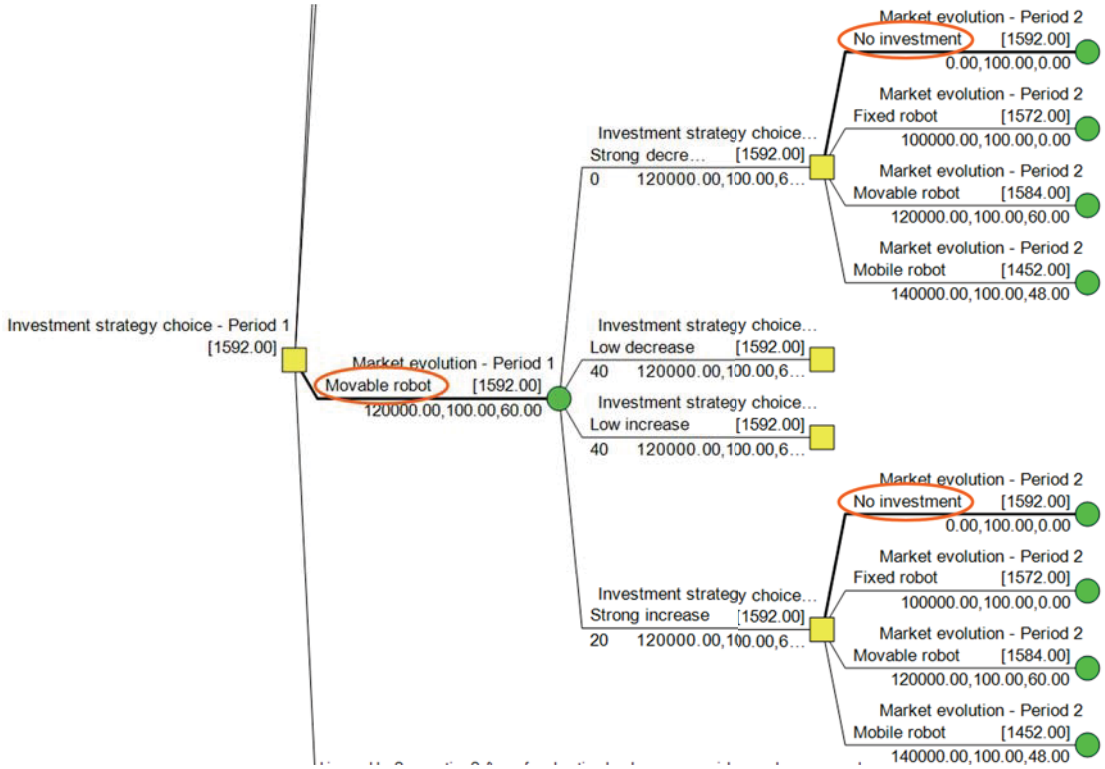


Figure 3 – Proposed alternative

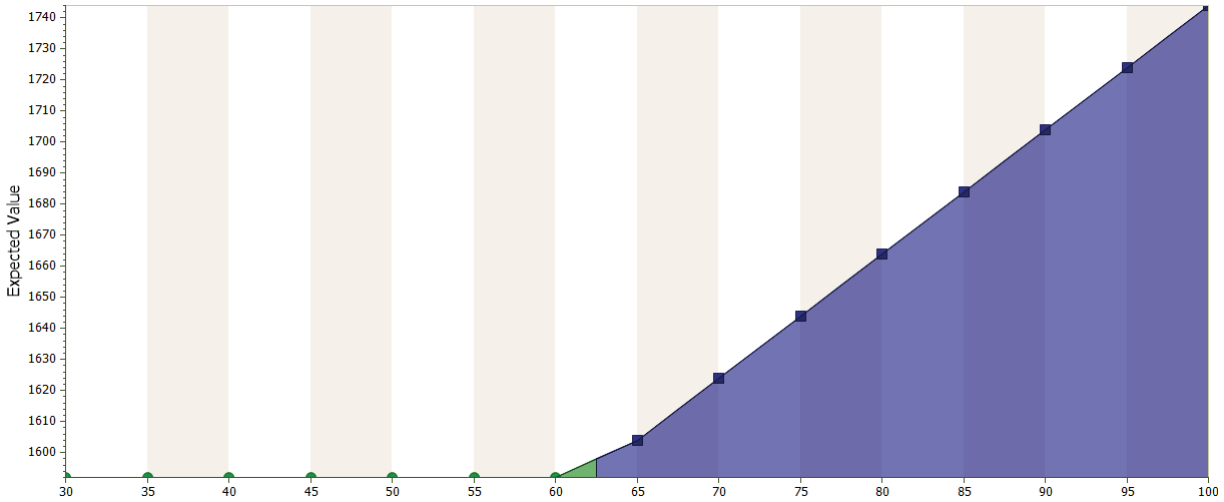


Figure 4 – Result of the sensitivity analysis on the second scenario

ios defined by probabilities of occurrence. We are able to build a model taking into account the four axis to evaluate a reconfigurable system: costs, performance, reconfigurability and maturity.

Influence diagrams and decision tree are efficient tools to represent and communicate on various scenarios. They give a clear overview on relationships between decisions, events and relevant values, and illustrate at one sigh all possible alternatives.

Results obtained in this study are promising and give a new insight in the RMS/RAS design process. By enabling a sensitivity analysis on one of the input criteria, such as the maturity of a type of resource, this approach supports the industry to evaluate the right moment to invest in a new type of resource. The model is adaptable to the evolution of resources and it is also possible to add new technological bricks as investment alternatives. This way, the method helps the upgrade of production facilities regarding Industry 4.0.

The scenario presented in this paper is elementary and does not reflect entirely complex scenarios occurring in the real world. The voluntarily simple scenario

enables to present all features of the methodology, and can be applied on more complex cases.

4 CONCLUSION

In this paper, we propose the application of decision analysis on the RPSDP. The utility function is built based on the parameters of the RMS/RAS, which are reconfigurability, productivity, investments and maturity of technological bricks. The attitude towards risk of the decision maker and the relative weights of the attributes are obtained by evaluation of equivalent lotteries. For the studied production scenarios, occurrence probabilities are defined and validated by experts. Based on this data, and by applying decision analysis on the RPSDP, we obtain a suggestion for the design strategy. This new methodology provides an evaluation of many parameters of the problem, and aims to erase psychological bias in the design process. Furthermore, the summation of all relevant data and scenarios in a single decision tree supports communication in decision meetings.

A limitation of the approach is the necessity to have results regarding productivity available for all alternatives, obtained by simulation. This implies a time-consuming preliminary work.

Regarding the presented case study, more complex scenarios have to be tested. The possibility to invest in different types of resources can be modeled, for example as a combination of movable and fixed robots, instead of making a separation between resource types as presented in this paper.

The tool used for decision analysis is currently independent of other modules of the approach. Further research will focus on the automation of the analysis, by implementing gateways between the reconfigurability indicators calculation module, the DES software, optimisation module, and the risk decision analysis software. This development will support a non-specialist to be able to run the analysis autonomously.

ACKNOWLEDGMENTS

This work took place in the framework of the OpenLab "Materials and Processes" combining ENSAM network, GeorgiaTech Lorraine and Groupe PSA.

REFERENCES

Andersen, A.-L., ElMaraghy, H., ElMaraghy, W., Brunoe, T. D. and Nielsen, K., 2017. A participatory systems design methodology for changeable manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 2(3): p. 1-19.

Beauville dit Eynaud, A., Klement, N., Roucoules, L., Gibaru, O. and Durville, L., 2018. UML-based reconfiguration rate analysis of assembly line depending on robot integration. *IFAC-PapersOnLine* 51-11: p. 1168-1173.

Beauville dit Eynaud, A., Klement, N., Roucoules, L., Gibaru, O. and Durville, L., 2020. Framework for the design and evaluation of a reconfigurable production system based on mobile robot integration. *Submitted to the Journal of Manufacturing Systems*. Under Review.

Clemen, R. T. and Reilly, T., 2013. Making Hard Decisions with DecisionTools - 3rd Edition. South-Western, Mason.

Goodwin, P., 2004. Decision trees and influence diagrams. In: Decision Analysis for Management Judgment - 3rd Edition, Goodwin, P. and Wright, G., p.143–164. Wiley ISBN: 0-470-86108-8

Keeney, R. L., 1974. Multiplicative Utility Functions. *Operations Research*, 22(1): p. 22-34.

Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G. and van Brussel, H., 1999. Reconfigurable Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP* 48: p. 527-540.

Lassagne, M., 2000. Applying a Decision-Analysis-Based Method to the Evaluation of Potential Risk Reducing Measures: The Case of a Floating Production Storage and Offloading Unit in the Gulf of Mexico. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.

Rösiö, C., Aslam, T., Srikanth, K. B. and Shetty, S., 2019. Towards an assessment criterion of reconfigurable manufacturing systems within the automotive industry. *IFAC-PapersOnLine* 28: p. 76-82.

Tchoffa, D., Duta, L. and El Mhamedi, A., 2012. Decision analysis in management of industrial incidents. *IFAC Proceedings Volumes* 45(6): p. 23-25.

Tversky, A. and Kahneman, D., 1974. Judgement under uncertainty: heuristics and biases. In: Wendt D., Vlek C. (eds) *Utility, Probability, and Human Decision Making. Theory and Decision Library* 11: p. 141-162. Springer, Dordrecht

Wang, G. X., Huang, S. H., Yan, Y. and Du, J. J., 2017. Reconfiguration schemes evaluation based on preference ranking of key characteristics of reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies* 89: p. 2231-2249.

HOLISTIC MANAGEMENT OF RISKS FOR ROAD TUNNELS

Konstantinos Kirytopoulos[1]*, Emmanouil Dermitzakis[1], Panagiotis Ntzeremes[1] and Georgios Chatzistelios[1]

[1]School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece
*kkir@mail.ntua.gr, corresponding author

ABSTRACT: *Managing successfully the risks in the transportation domain is a prerequisite in order to increase its safety and also to guarantee a high quality of operation. As far as road transport is concerned, upgrading its safety is in the forefront since roads have the largest share in the movement of both goods and people, worldwide. Among the various elements of road transport, tunnels particularly are considered the most "sensitive" part of the road infrastructure. Potential seriousness of accidents in road tunnels was justified in the consequences derived from past accidents, especially those resulted in fires. In order to prevent road tunnels from potential fire accidents as well as to minimize their consequences, if they occur, it is necessary to manage the safety of tunnels through a holistic approach by examining all the parts of these complex socio-technical systems. Therefore, this paper introduces the plan for the development of an intelligent system for managing holistically fire risks in tunnels by synthesizing new and innovative technical installations together with advanced human-related methods. The presented system aims to support control rooms of road tunnels to response adequately in case of potential fire incidents guaranteeing thus higher level of fire safety for these critical road infrastructures.*

KEYWORDS: *Risk management, Fire safety, Intelligent communication system, Mass notification*

1 INTRODUCTION

Road transport has the largest share in the movement of goods and people among the rest transport modes (Ntzeremes and Kirytopoulos, 2019). In order to achieve the sustainable development as well as the high quality of road networks' operation, an increased level of safety of road infrastructure is a prerequisite (Ntzeremes et al., 2020a). In particular, road tunnel safety is a major issue as tunnels are a key part of road infrastructure (PIARC, 2007). In general, tunnels have very high requirements in capital and human resources while their enclosed environment poses the dangerousness of potential accidents in them (Ntzeremes and Kirytopoulos, 2019). However, the improvement of construction technology over the past two decades has further highlighted the contribution of tunnels as an economically viable solution to the development of new road networks (Maidl et al., 2014).

Despite the economic benefits the use of road tunnels renders to the transportation sector, it also poses a particularly significant inherent risk of serious accidents that may occur within them, namely, fire accidents (Ren et al, 2019). When such accidents occur, due to the closed environment of the tunnels, adverse effects can be caused, especially in terms of human losses and damage to equipment and infrastructure of the tunnel (Kirytopoulos et al., 2017).

Road tunnels, because of the different, infrastructure elements, actors and technologies involved, are complex socio-technical systems. The level of safety of such a system is composed of the close co-operation and interaction of mainly four parts that define it and which are: the users, the vehicles, the equipment and the infrastructure itself of the tunnel (PIARC, 2008). Therefore, to manage successfully fire risks in tunnels as well as to minimize their consequences, if they occur, it is necessary to holistically manage the safety of the tunnel system by examining all the parts of this complex socio-technical system.

Therefore, this paper introduces the plan for an intelligent communication system for managing holistically fire risks in tunnels by synthesizing new and innovative technical installations together with advanced anthropocentric methods. Fire risks may include a fire inside the tunnel from vehicles carrying dangerous and/or non-dangerous goods, the presence of high levels of carbon monoxide and other toxic gases, the release/leakage of flammable volatile liquids/gases on the road, etc. The presented system aims to support control rooms of road tunnels to response adequately in case of potential fire incidents guaranteeing thus higher level of fire safety for these critical road infrastructures.

This research aims at enhancing the level of safety of road tunnels and is supported with European Union and Greek national funds through the Operational Program Competitiveness, Entrepreneurship and Innovation, under the call RESEARCH – CREATE – INNOVATE (project code: T1EDK-02374).

2 LITERATURE REVIEW

A significant number of studies focusing on the analysis of fire accidents in road tunnels justifies that fire is the most fearful and important threat inside tunnels, despite the fact that fires in road tunnels are not common phenomena. (Hansen and Ingason, 2011).

In Norway, a country with over a thousand road tunnels, a survey of vehicle fires inside them was conducted by Nævestad and Meyer (2014). This survey concluded that a) the fires did not always involve harm to road tunnel users, b) heavy vehicles such as trucks were overrepresented in fires studied, c) the causes of road tunnel fires involving heavy and light vehicles were different, and d) subsea road tunnels and tunnels with high gradient were particularly vulnerable to vehicle fire. The last finding is unique since Norway has the most (31) subsea road tunnels and 10 tunnels that have a very high (over 5%) gradient. Added, these two categories together, gives 41 road tunnels which is nearly 4% of all the Norwegian road tunnels. Results of this study show that nearly one out of two fire accidents in Norwegian road tunnels happened either in subsea or high gradient tunnels (Nævestad and Meyer, 2014).

A recent analysis of fire accidents in Chinese highway tunnels from Ren et al. (2019) found that the average prevalence of tunnel fire accidents has shown yearly increase during the last 20 years. This study also concentrated on specific locations that are fire accident prone, as seem to be the entrances and exits of highway tunnels. Heavy vehicles such as trucks are also indicated in this study as the vehicle type that is most involved in tunnel fire accidents. According to the study, heavy vehicles also carry the risk of triggering secondary fires, mainly since the materials they carry are frequently combustible. Even further, in case of road congestions, heavy vehicles if involved in an accident may exert major disastrous consequences. This study also notes that heavy goods vehicles are prone to fire tunnel accidents, since they maintain a quite large proportion of involvement despite of the fact that, in terms of general traffic, they maintain a much smaller proportion (Ren et al., 2019).

An important actor in case of a tunnel fire accident includes the tunnel users. Kirytopoulos et al. (2017) highlighted that smoother adverse consequences of a potential fire accident could be possible from correct users' behaviour. In their survey, they explored Greek tunnel users' awareness and identified potential knowledge gaps. The survey results blurt out users' misconceptions related to recommended users' behaviour in both normal and critical situations. The researchers also noted that people tend to adopt others behaviour especially in critical situations. In conclusion, they suggested that tunnel operators should focus on users' behaviour and knowledge which might significantly increase the overall safety of key infrastructures such as tunnels (Kirytopoulos et al., 2017).

In Xie et al. (2020) study, an experiment was conducted to study the characteristics of the evacuation process in a subsea road tunnel. The experiment included two buses filled with passengers. The buses catch fire near an emergency exit of the tunnel. According to the scenario, passengers had to get off the two buses, then evacuate against the direction of the traffic, to the nearest evacuation slide, which led to the secure channel and finally, get out to the ground through the shaft. The study concluded that the evacuation process was seriously affected by the composition of the passengers, the use of carry-on luggage, the guidance of the bus driver, the tunnel structure, and the slide type (Xie et al., 2020).

Fire and rescue personnel have been highlighted as significant actors during a tunnel fire incident. Bjørnsen and Njå (2019) focused on the skills and knowledge that is absolutely necessary for the rescue personnel in order to perform an effective emergency response in the event of a tunnel fire accident. They recognized that although the Norwegian Fire Academy has an established educational program which consists of both practical and theoretical training as well as courses comprising fire protection and rescue operations, the fire and rescue personnel learns a great deal mostly in informal learning situations. Informal learning situations include mainly the experience gained after the occurrence of major events in tunnels and discussions analysing these events. They also recognized that the fire and rescue services have a high degree of freedom to implement learning and training activities regarding tunnel fire safety and they proposed the use of formal learning agents in order to avoid the varying and subjective interpretation of the important aspects constituting essential knowledge and competence.

Besides, Casse and Caroly (2019) highlighted that tunnel users' behaviour might be a source of disruption on operators' activity. Their study focused on identifying the critical situations that road tunnels professionals might face (i.e. control room personnel and personnel patrolling in tunnels). The findings demonstrate that critical incidents for road tunnel professionals are mainly common action situations which take place in a dynamic and complex environment mainly because of the diversity of actors and the interaction between them. By analysing data of critical incidents in road tunnels, the study revealed the lack of trainings and insufficient and divergent safety procedures, which could lead to a disaster in case of a road tunnel accident. The researchers stressed the need to define an efficient system for the systematisation of the collecting and analysing of critical incidents to enhance experiential learning (Casse and Caroly, 2019).

3 STRUCTURE OF THE PROPOSED SYSTEM

The proposed intelligent communication system pursues to fulfill the following central objectives (see Figure 1):

- Development of a holistic method for the management of fire risks that may arise in the road tunnel system.
- Educating tunnel operators that have the primary and central role in the management of risks about the potential behavior of users participating in the accident as well as informing tunnel operators about the availability of system's resources.
- Examining fire behavior inside the tunnel and analyzing users' evacuation process.
- Development of an intelligent communication system based on new and innovative technical installations together with advanced human-related methods.

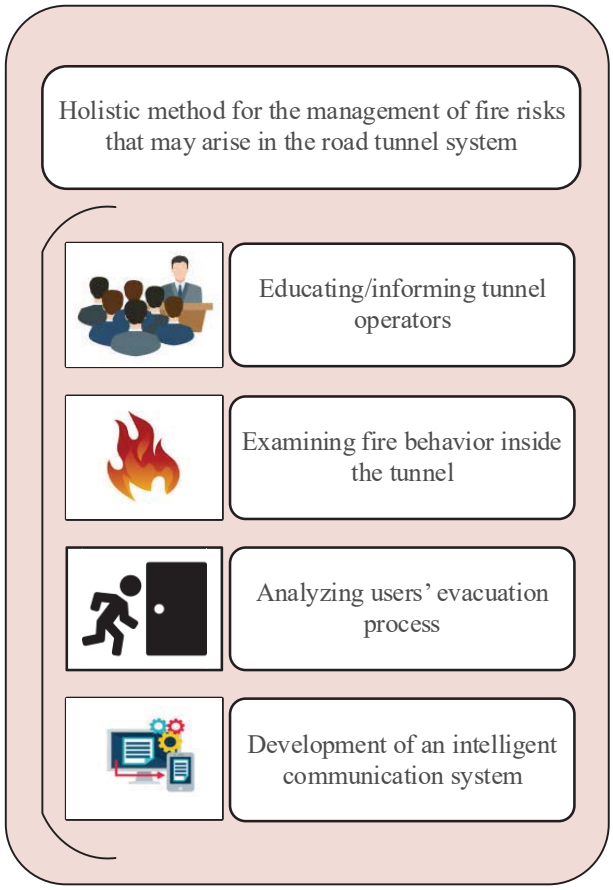


Figure 1. Central research objectives for the development of a comprehensive intelligent communication and holistic risk management system.

These objectives are related with the first four axes depicted in Figure 2, whereas the fifth axis of Figure 2 is the application of the new system on a drill that will be organized for the purposes of the project in a tunnel longer than 500m length, which is part of the Greek motorway of "Egnatia Odos S.A." and the Trans-European Road Network.

In brief, the first axis is twofold. Initially, it will focus on the development of the method for managing holistically the fire risks in tunnels. To do so, the proposed method will take into account the type of fire risks (i.e. whether fires involve dangerous goods), the available tunnel facilities and equipment, the behavior of the users, and the actions of the operators of the control room (official protocols) along with the operating personnel. The method will be designed based on the system theoretic approach (Kazaras et al., 2012). In parallel, this axis focuses also on developing a new software installed in technical installations already used by the tunnel personnel for informing tunnel operators about the availability of system's resources (Asiminidis et al., 2019a). This system will inform real-time the intelligent communication system. Based on this installation, a machine learning algorithm will be developed in order to optimize the response of relevant emergency services, including the operators patrolling teams.

The second axis focuses on tunnel users and their knowledge regarding safety and proposed actions in case of an emergency situation (PIARC, 2011). Relevant literature has shown that their behavior impacts directly in the safety level of the tunnel and can affect the response of tunnels' control room (Ntzeremes et al., 2020b). An initial questionnaire study has already illustrated several misconceptions (Zeeri et al., 2019). To this respect, the results will be used as feedback for the development of a software tool following the gamification approach for supporting drivers' education on properly behaving in case of a tunnel accident resulting in fire. However, the initial objective of this axis is to communicate to the tunnel operators that have the first and central role in the management of risks about the potential behavior of users participating in the accident.

The third axis will explore in depth the fire evolution in parallel with users' evacuation process. Initially, a novel software will be developed utilizing technical installations already existed in tunnels in order to scan and identify the vehicles that carrying dangerous goods and will pass through the tunnel. The literature indicated that when heavy good vehicles carrying dangerous goods are involved, the adverse effects are increasing significantly. This system will inform real-time the intelligent communication system. In addition, a risk analysis study is performed in order to assess the vulnerability of the tunnel system and the performance of users' evacuation process (Ntzeremes et al., 2019). Furthermore, risk analysis will examine the impact on users' evacuation of the installation of "smart" emergency exits that are controlled by the control room of the tunnel.

The fourth axis comprises an innovative integrated communication system that is expected to be able to orchestrate the response during a fire accident. In general, fire events as any critical and emergency incident often lead to asset, infrastructure and human losses, all major concerns for tunnel managers. Thus, early prediction, emergency management plans and immediate dissemination of information can mitigate the consequences of such events or even prevent them from occurring. To this respect, an intelligent early warning system will be developed. The warning system will comprise of sensors, event detection and decision subsystems that will work together to forecast the occurrence of possible incidents. These forecasts are then processed by a mass notification system for the dissemination of public alert guidelines and coordinated emergency group actions (Asiminidis et al., 2019b).

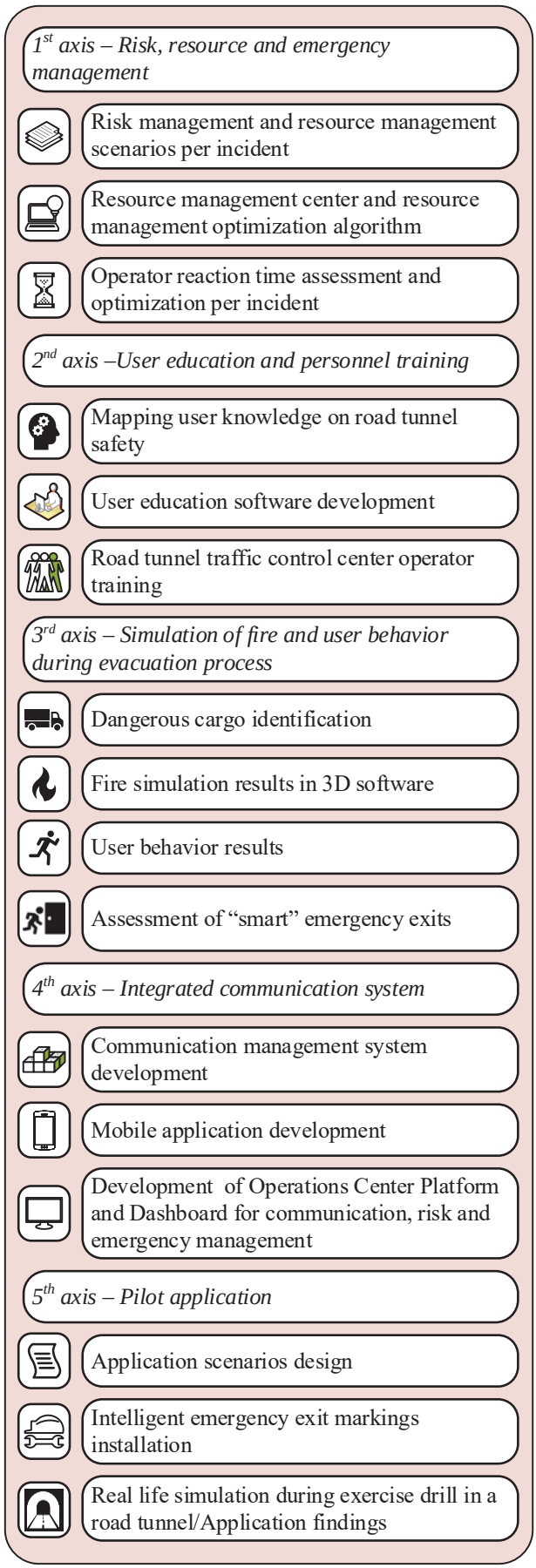


Figure 2. Axes of the research project

4 IMPACT OF THE PROPOSED SYSTEM

Road tunnel safety is an important issue as road tunnels are a key part of road infrastructure with very high capital and human resources requirements. The significant rise in the number of road tunnels with the simultaneous increase in the number of users and the volume of commodities passing through them, has made their safety a goal more relevant than ever.

By analyzing the relevant data from previous critical incidents in road tunnels and especially the users' behavior in case of these accidents, the lack of an efficient data-driven system in the context of road tunnel operation for the systematization of safety procedures becomes evident. Furthermore, there is a lack in training of users that could easily result in misapplication of safety procedures and further lead to a disaster in case of a fire incident.

In an emergency incident we expect the road tunnel control center to be in charge of many responsibilities and tasks that must be implemented at the operational level in a short period of time. The process of situation awareness includes assessing the risks, estimating the number of victims and predicting the future development of the situation. Situation assessment is a process that is closely linked to the assessment of human and material resource needs, and must be repeated at regular intervals to assess the effectiveness of ongoing action plans. Critical information needed to manage the incident may not be available, while others may be unreliable or difficult to understand. Given the fact that emergency services are becoming increasingly dependent on technology, an information system that could gather information and support the implementation and coordination of the control center would be an excellent supporting factor for the crisis management center. However, in order to design such a system, it is necessary to define the organizational structure of the team that will be called to manage the emergency. Also, a deep understanding of all the precarious conditions and pathogenies that may lurk at the organizational and administrative level, as well as dangerous/threatening events that may occur at the operational level in the road tunnel system, is of paramount importance for the increase of the safety level of the tunnel system.

The development of an innovative service of resource management software, with emphasis on the construction of the resource availability optimization algorithm, aims to manage emergencies in the highway tunnels. Specifically, it focuses on estimating operator response time and optimizing it per road tunnel incident.

The development of an appropriate service and identification algorithm for vehicles bearing plates for the transport of dangerous goods (ADR) will enhance the readiness of the control centers.

The investigation of fire conditions in a tunnel and of the possibility of its safe evacuation in order to determine the probable behavior of tunnel users as well as the effect of "smart" exits will enhance the level of the road tunnel safety, as it will contribute to the detection of its

vulnerability and the design of appropriate response strategies.

According to its design, the innovative integrated communication system utilizes data from the resource management system for emergency incidents and events in real time and provides the ability to automatically or manually activate the appropriate response protocols (Start Event/Emergency Incident Management).

This project is expected to enhance the body of knowledge regarding road tunnel safety. The immediate impacts regard:

- the improvement of safety operations and the optimisation of the relevant processes on behalf of the tunnel operator,
- the education of tunnels users on safety measures and relevant procedures, and
- the potential contribution in supporting tunnel operators to confront fire incidents successfully.

The most important consequence of the project will be, in the long term to lead to the wide application of its methods, tools and standards, in order to achieve higher level of services from the tunnel operators, in terms of transport infrastructure projects, thus strengthening the competitiveness in transport services and supporting the domestic economy.

ACKNOWLEDGMENTS

This research has been co-financed by the European Union and Greek national funds through the Operational Program Competitiveness, Entrepreneurship and Innovation, under the call RESEARCH – CREATE – INNOVATE (project code: T1EDK-02374). Project partners: Sector of Industrial Management and Operational Research of the National Technical University of Athens, Egnatia Motorway S.A., National Centre of Scientific Research "Demokritos", Tekmon P.C., Department of Mathematics of the University of Ioannina.

REFERENCES

Asiminidis, Ch., Georgiadis, I., Syndoukas, D., Kokkonis, G. and Kontogiannis, S. 2019a. "Performance evaluation on encrypted-non encrypted database fields containing IoT data", In Proc. Of the 23th International Database Engineering and Applications Symposium, Athens, ACM proceedings, presented May 2019, Harokopio University, Athens, Greece

Asiminidis, C., Kontogiannis, S., Kokkonis, G., Zinas, N. and Papadopoulos, C. 2019b. "Mass notification for public safety: Current status and Technical Challenges". Risk Analysis Based on Data and Crisis Response Beyond Knowledge: in Chongfu Huang and Zoe S. Nivolianitou Proceedings of the 7th International Conference on Risk Analysis and Crisis Response (RACR 2019), Athens, Greece, October 15-19, 211-216, CRC Press.

Bjørnsen, G. and Njå, O., 2019. "Applying Systems Theory to Increase Competence in Tunnel Fire Safety – Focusing on the Fire and Rescue Services". 29th European Safety and Reliability Conference, October, 3292–3299.

Casse, C. and Caroly, S., 2019. "Analysis of critical incidents in tunnels to improve learning from experience". Safety Science, 116, 222–230.

Hansen, R. and Ingason, H., 2011. "An engineering tool to calculate heat release rates of multiple objects in underground structures". Fire Safety Journal, 46(4), 194-203.

Kazaras, K., Kirytopoulos, K. and Rentizelas, A., 2012. Introducing the STAMP method in road tunnel safety assessment. Safety Science, 50, 1806-1817.

Kirytopoulos, K. Kazaras, K., Papapavlou, K. Ntzeremes, P. and Tatsiopoulos, I. 2017, "Exploring driving habits and safety critical behavioural intentions among road tunnel users: A questionnaire survey in Greece", *Tunnelling and Underground Space Technology*.

Maidl, B., Thewes, M. and Maidl, U., 2014. Handbook of Tunnel Engineering Vol. I and II, Wiley, London

Nævestad, T. O. and Meyer, S., 2014. "A survey of vehicle fires in Norwegian road tunnels 2008-2011". Tunnelling and Underground Space Technology, 41(1), 104–112.

Ntzeremes, P. and Kirytopoulos, K., 2019. "Evaluating the role of risk assessment for road tunnel fire safety: A comparative review within the EU". Journal of Traffic and Transportation Engineering, 6(3): 282–296.

Ntzeremes, P., Kirytopoulos, K. and Leopoulos, V. 2019. "Developing a risk-based method for predicting the severity of fire accidents in road tunnels". Risk Analysis Based on Data and Crisis Response Beyond Knowledge: in Chongfu Huang and Zoe S. Nivolianitou Proceedings of the 7th International Conference on Risk Analysis and Crisis Response (RACR 2019), Athens, Greece, October 15-19, 518-525, CRC Press.

Ntzeremes, P., Kirytopoulos, K. and Leopoulos, V., 2020a. "Development of a risk-based method for predicting the severity of potential fire accidents in road tunnels based on real-time data", Environmental Research, vol. 189.

Ntzeremes, P., Kirytopoulos, K. and Leopoulos, V. 2020b. "Discussing the need to manage uncertainty relating to users in road tunnel fire risk assessment", Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 10(1), 12 - 18.

PIARC, 2011. "Recommendations Regarding Road Tunnel Drivers' Training and Information". World Road Association (PIARC), France.

PIARC, 2008. "Risk Analysis for Road Tunnels". World Road Association (PIARC), France.

PIARC, 2007. "Integrated Approach to Road Tunnel Safety". World Road Association (PIARC), France.

Ren, R., Zhou, H., Hu, Z., He, S., and Wang, X., 2019. "Statistical analysis of fire accidents in Chinese highway tunnels 2000–2016". Tunnelling and Underground Space Technology, 83, 452–460.

Xie, B., Zhang, S., Xu, Z., He, L., Xi, B., and Wang, M., 2020. "Experimental study on vertical evacuation capacity of evacuation slide in road shield tunnel". Tunnelling and Underground Space Technology, 97.

Zeeri, M.O., Kirytopoulos, K. and Ntzeremes, P. 2019, "Exploring road tunnel drivers' behavior: The case of Greece", in Michael Beer and Enrico Zio (eds), Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2019), European Safety and Reliability Association, Research Publishing, Hannover, Germany, September 23–26, pp. 253-260.

REVUE DES METHODES D'EVALUATION DES CONTRAINTES ERGONOMIQUES DES OPERATIONS DE PRODUCTION ET DE LEUR INTEGRATION DANS UN SYSTEME DE PRODUCTION CYBER-PHYSIQUE

MURCIA Nicolas

LS2N, UMR CNRS 6004, Université de Nantes, IUT de Nantes, 44 470 Carquefou, France
AIRBUS, 60 Rue Anatole France, 44550 Montoir-de-Bretagne, France

Nicolas.murcia@ls2n.fr

CARDIN Olivier

LS2N, UMR CNRS 6004, Université de Nantes, IUT de Nantes, 44 470 Carquefou, France

Olivier.Cardin@ls2n.fr

MOHAFID Abdelmoula

LS2N, UMR CNRS 6004, Université de Nantes, IUT de Nantes, 44 470 Carquefou, France

Abdelmoula.Mohafid@ls2n.fr

RESUME : *Ces dernières années les facteurs humains sont devenus une variable de plus en plus décisive dans l'organisation des processus de production de l'industrie manufacturière. Le déploiement futur de systèmes cyber-physiques de production impose une meilleure prise en compte de ces objectifs, à la fois en termes prévisionnels qu'en temps-réel. Dans cet article, nous proposons une revue des différentes méthodes d'évaluation ergonomique et une évaluation des possibilités pour intégrer les variables ergonomiques dans les processus d'optimisation de l'affectation des opérations de production. Une large variété d'outils et de méthodes ont été développés afin de mesurer et d'évaluer les risques à la fois physiques mais aussi psycho-sociaux dans un environnement de travail. Nous effectuons alors une revue des principales méthodes décrites dans la littérature, catégorisées en trois principales sections : les méthodes d'observation, les méthodes d'auto-évaluation et celles basées sur les mesures. Cette grande diversité de méthodes d'évaluation est directement liée à la flexibilité requise par les experts de la santé pour analyser précisément les différentes situations sur le terrain. La plupart des méthodes d'ordonnancement des tâches prenant en compte l'ergonomie qui ont été examinées utilisent une méthode de mesure différente, ce qui rend difficile une comparaison de l'efficacité d'une possible optimisation.*

MOTS-CLES : *Industrie 4.0, Ergonomie, Facteurs humains, Système cyber-physique de production*

1 INTRODUCTION

Un des objectifs majeurs de l'Industrie 4.0 est d'introduire le facteur humain dans la gestion des processus de fabrication, la sécurité au travail est naturellement devenue une préoccupation importante pour l'industrie manufacturière dans le cadre de l'amélioration des performances. Au cours des vingt dernières années, le développement des méthodes de fabrication a augmenté le risque de maladies professionnelles pour les travailleurs, en partie en raison de la transition des processus de fabrication vers le Lean management. Le Lean management contribue à une intensification du travail à cause d'une réduction des durées de cycle de production (Koukoulaki 2014). Les travailleurs des industries manufacturières effectuent généralement des tâches répétitives qui les exposent à une charge de travail physique intense pouvant induire des troubles liés au travail tels que des troubles musculo-squelettiques (Antwi-Afari et al. 2017). Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont des troubles qui affectent les tissus mous du corps humain (c'est-à-dire les muscles, nerfs, tendons, ligaments, etc.) et limitent les mouvements du corps

(Bernard and Putz-Anderson 1997). Les TMS ont un impact social énorme, car un tiers des travailleurs européens de tous les secteurs d'activité souffrent actuellement de TMS, ce qui représente environ 45 millions de personnes (Parot-Schinkel et al. 2012). En Europe, les risques de TMS sont amplifiés par le phénomène du "vieillissement de la main-d'œuvre" (Bevan 2015), la population de travailleurs âgés de 50 ans ou plus est 2 fois plus importante que celle des travailleurs âgés de 25 ans ou moins. Les TMS ont des effets néfastes sur la qualité de vie des travailleurs et constituent la principale cause d'absences pour maladie professionnelle et de journées de travail perdues (Roux 2005). Le coût de la perte de productivité due aux TMS est estimé à près de 2% du produit intérieur brut en Europe (Bevan 2015). Les principaux facteurs de risque des TMS sont les contraintes biomécaniques, mais il est largement admis que les maladies professionnelles au travail sont causées par un ensemble de contraintes multifactorielles (David 2005).

Le déploiement des systèmes cyber-physiques de production (CPPS) dans l'industrie du futur implique une prise en compte de nombreuses contraintes dans l'organisation de production, visant à améliorer simultanément la performance de l'outil de production à la fois en termes de productivité qu'en terme de soutenabilité. Dans ce contexte, il est nécessaire de mieux maitriser la mesure et l'évaluation de la pénibilité des opérations de production et de leur impact sur les opérateurs.

La pénibilité d'une tâche est l'effort perçu pour la réaliser. Il s'agit de la donnée ergonomique principale utilisée pour évaluer les caractéristiques d'un travail. Pour évaluer cette pénibilité et le risque physique, il existe trois catégories de méthodes : les méthodes d'observation, les questionnaires d'auto-évaluation et les méthodes de mesure (David 2005). Le choix de la méthode d'évaluation ergonomique est basé sur l'objectif de l'évaluation, les caractéristiques du travail à évaluer et les ressources disponibles pour la collecte et l'analyse de l'évaluation. Pour réduire ces risques physiques et psychologiques, les responsables organisationnels œuvrent en collaboration avec les ergonomes, pour trouver des solutions à ces problématiques ergonomiques. Ce processus est schématisé dans la figure 1. Avant d'entreprendre toute action ergonomique, la première étape consiste à identifier le risque physique, comme une mauvaise posture, une charge lourde ou une importante répétitivité des tâches, qui pourraient, à terme, provoquer des TMS chez les travailleurs.

Cette identification peut se faire directement à partir des plaintes des travailleurs qui mettent en évidence une situation pénible pendant leur travail. Les risques physiques importants peuvent également être mis en évidence par une augmentation des maladies professionnelles ou un absentéisme important pour l'usine ou plus précisément au poste de travail. Ces identifications conduisent à une évaluation ergonomique réalisée avec l'aide d'un expert de la santé qui choisit une méthode de mesure afin d'identifier les risques physiques et d'évaluer leur niveau pour la situation identifiée. Une fois l'évaluation effectuée, l'objectif est de trouver une solution qui respecte un budget et qui réduit les risques pour les travailleurs. La solution proposée est souvent une amélioration du design du poste de travail ou l'ajout d'une solution technique, par exemple un exosquelette pour soulager le travailleur lorsqu'il porte une charge. L'évaluation ergonomique se termine par le retour d'information du travailleur et l'évaluation de la méthode utilisée pour améliorer la situation de travail.

Aujourd'hui, de nombreuses solutions techniques impliquant une modification du poste de travail sont soit déjà utilisées en pratique, soit, si elles ne le sont pas, trop coûteuses pour être réalisables dans l'industrie. Dans les deux cas, les risques sont toujours présents car aucune solution n'est efficace à 100% sur le long terme. Dans ce contexte, nous nous intéressons aux méthodes développées par les managers, en collaboration avec des spécialistes de la santé afin de réduire les risques de développer des maladies professionnelles pour les travailleurs de l'industrie.

Dans cet article, nous décrivons le processus global d'équilibrage des opérations de productions prenant en compte l'ergonomie dans la littérature. Nous comparons ensuite les différentes méthodes utilisées pour recueillir des données sur les différents risques ergonomiques. Ces méthodes sont classées en trois sous-catégories qui sont les méthodes d'observation, les méthodes d'auto-évaluation et les méthodes de mesure. Nous proposons par la suite une discussion sur ces méthodes et leur utilisation dans l'équilibrage des tâches basé sur l'ergonomie.

Cette étude est le point de départ d'une réflexion sur l'intégration des données ergonomiques dans un système de production cyber-physique et cherche à apporter une vue d'ensemble plus récente des différentes méthodes de mesures ergonomiques, notamment les méthodes virtuelles.

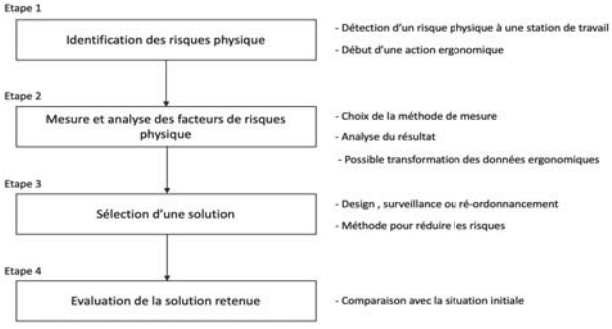


Figure 1 : Exemple de processus d'évaluation ergonomique

2 PROCESSUS D'EQUILIBRAGE DES TACHES BASE SUR L'ERGONOMIE DANS LA LITTERATURE

Des études et des enquêtes ont montré que les mouvements répétitifs au travail constituent l'un des principaux facteur de risque de maladies professionnelles, au même titre que les postures contraignantes et la levée de poids lourds (van Tulder et al. 2007). Les premiers cas de rotation des postes de travail sont apparus en 1975 avec le développement du nouveau système de production de Toyota et la première utilisation de la gestion allégée des ressources humaines (Muramatsu et al. 1987). Cette idée de rotation des postes est venue des travailleurs qui voulaient plus de flexibilité pour la période de leur pause. Les ergonomes et les responsables organisationnels de l'industrie ont alors commencé à développer la rotation des postes de travail comme solution pour réduire la pression répétitive sur les travailleurs. Les données ergonomiques sont complexes à utiliser et il est nécessaire de les traiter afin de pouvoir les utiliser comme variable de décision dans les CPPS La plupart des processus d'équilibrage des postes basés sur l'ergonomie dans la littérature et leur application ont un processus similaire.

Pour ce processus, nous avons identifié trois phases différentes (voir figure 2), la première s'articulant autour de l'identification et de la mesure des facteurs de risque ergonomiques. Le premier choix important est la sélection des facteurs de risque ergonomiques utilisés dans l'optimisation, par exemple il peut être axé autour des risques physiques tels que les risques posturaux, ou des risques psychosociaux comme le bien-être au travail. Dans les deux cas, ces risques ergonomiques sont mesurés avec l'aide d'un expert de la santé selon une méthode d'évaluation précise choisie au préalable. Une fois que les variables de risque ergonomique sont définies et associées à une valeur représentant le niveau de risque, le problème d'optimisation basé sur l'ergonomie se pose. Étant donné que les mesures ergonomiques sont souvent des valeurs qualitatives, les données peuvent nécessiter une adaptation afin de s'inscrire dans un problème d'optimisation. Par exemple, une mesure par la méthode des couleurs peut être transformée en un score (Moussavi et al. 2019) ou un niveau d'exposition peut être transformé en une probabilité de risque de blessure (Sobhani et al. 2017). Les problèmes d'optimisation de l'effet sur le travail sont principalement simulés comme un problème d'équilibrage de ligne ou de rotation de poste (Padula et al. 2017; Grosse et al. 2017; Otto and Battaïa 2017). La répartition du risque physique entre les opérateurs de production est l'objectif le plus courant dans ces différentes formulations. Certaines études prennent également en compte l'aspect économique, en formulant une approche multi-objectifs entre les variables économiques et ergonomiques (Otto and Battaïa 2017). Lorsque le problème a été formulé, la phase restante consiste à trouver un moyen de le résoudre et à évaluer le résultat de l'optimisation, qui consiste le plus souvent à utiliser un solveur ou un algorithme reposant sur une méthode méta-heuristique. L'évaluation du résultat n'est pas triviale car les variables ergonomiques sont difficiles à quantifier, et les résultats attendus sont généralement sur le long terme, ce qui rend d'autant plus difficile cette évaluation. Une méthode d'évaluation envisageable est d'effectuer une comparaison avec la situation initiale et le lien avec le retour d'information des opérateurs de production peut donner une bonne évaluation de la méthode d'optimisation. Dans les prochains paragraphes nous examinerons plus en détail la phase 1, qui est l'évaluation des risques ergonomiques au travail, et nous passerons en revue les différentes méthodes d'évaluation ergonomique.

3 METHODES D'OBSERVATION

Les méthodes d'observation sont couramment choisies pour évaluer les risques physiques. Utilisées par les experts de la santé, elles consistent à examiner les processus de travail et à évaluer les facteurs de risque pour le travailleur selon une liste de contrôle ou une grille.

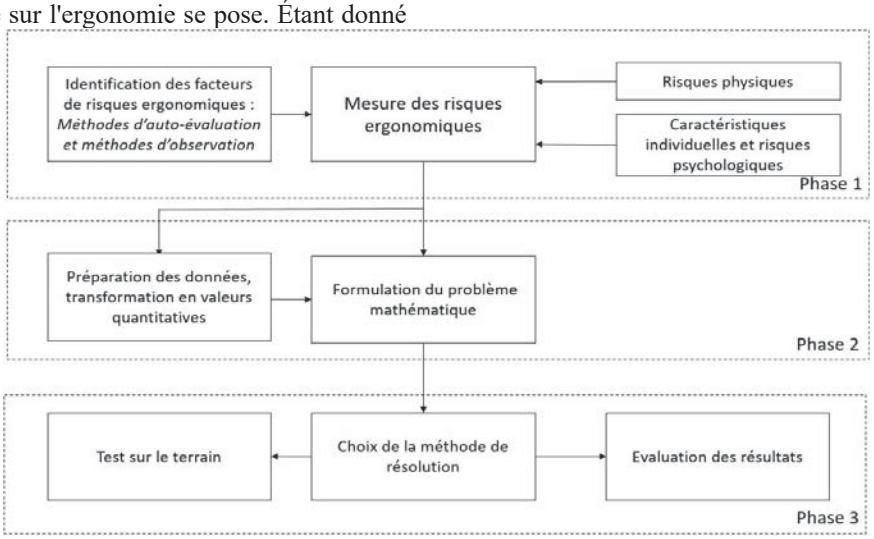


Figure 2 : Vue d'ensemble d'un processus de Job-Balancing avec prise en compte de l'ergonomie

Ces méthodes permettent de rapidement repérer les situations dangereuses à partir de l'évaluation de la durée d'exposition, de l'intensité de la tâche, de la répétitivité de l'exposition à un risque et les positions posturales inconfortables.

Dans l'industrie automobile, les méthodes d'observation sont largement utilisées pour évaluer les contraintes ergonomiques pour chaque poste de travail. Le résultat est représenté par un niveau de risque sur un critère donné, quantitativement avec un score ou qualitativement avec un code couleur, le rouge représentant un risque physique important, le jaune un risque modéré et le vert une situation sûre. Il existe plus de 30 méthodes d'observation (Takala et al. 2010) avec des différences sensibles sur la partie du corps étudiée et des seuils pour les différents facteurs d'expositions aux risques ergonomiques (Chiasson et al. 2012). Une comparaison des méthodes d'évaluation ergonomique par observation grandement rependues est effectuée dans le tableau 1. Ces évaluations de l'exposition aux risques physiques basées sur l'observation mesurent principalement les risques liés aux postures et à l'intensité d'une tâche sur l'ensemble du corps ou sur certaines régions. Cependant, ces méthodes donnent souvent des résultats différents et ne sont pas directement comparables, principalement parce que cela dépend de l'observation et parce qu'il n'existe pas de normes définies pour les mesures ergonomiques (McAtamney and Nigel Corlett 1993; Chiasson et al. 2012; Yildirim et al. 2014). Il est en effet impossible qu'une méthode d'observation soit optimale pour tous les scénarii et les paramètres à mesurer influencent la sélection de la meilleure méthode (Chiasson et al. 2012). Des méthodes plus avancées, y compris l'analyse vidéo des tâches, ont été développées pour améliorer la précision de l'évaluation ergonomique. L'analyse vidéo permet aux ergonomes de vérifier plusieurs fois et d'évaluer une situation de travail donnée et permet également d'avoir une réflexion avec le travailleur sur la pénibilité de cette situation.

Méthode de mesure des risques	Description de la méthode	Critères utilisés	Exemple d'étude utilisant cette méthode
RULA : Rapid Upper Limb Assessment (McAtamney and Nigel Corlett 1993)	Enquête sur les troubles des membres supérieurs liés au travail et spécifiques aux tâches répétitives	Posture du cou, tronc et jambes ; Énergie dépensée ; Force et répétition	(Jaturanonda and Nanthavanij; Bautista et al. 2016)
REBA : Rapid entire body assessment (Hignett and McAtamney 2000)	Méthode d'évaluation des postures pénibles sur l'ensemble du corps (tronc, cou, jambes, bras et poignets)	Posture of the body, intensity, movement, repetition and coupling	(Yoon et al. 2016)
OWAS: Ovako working posture Analysis System (Karhu et al. 1977)	Analyse de la pénibilité d'une posture sur l'ensemble du corps	Posture du corps complet	(Hellig et al. 2018)
OCRA : Occupational Repetitive actions (Occhipinti 1998)	Méthode d'évaluation de l'impact de la charge de travail sur le haut du corps	Posture, du corps, charge portée et vibration	(Boenzi et al. 2016)
EWAS : European Assembly Worksheet	Outil de dépistage de l'impact de la charge de travail sur l'ensemble du corps	Posture, intensité de l'action, mouvement et manipulation de charges	(Otto and Scholl 2013)
Revised NIOSH lifting Equation (Garg et al. 2014)	Méthode d'observation pour analyser l'impact physique et psychologique du port de charge sur les opérateurs de production	Posture et port de charges	(Otto and Scholl 2011; Bautista et al. 2016)
QEC : Quick Exposure Check	Méthode d'observation mis en correspondance avec l'évaluation de l'opérateur de production, étude sur l'intégralité du corps	Posture et intensité de l'action effectuée	(Li and Buckle 1998)
SI : Strain Index	Analyse du risque pour les mains et les poignets	Position de la main, répétitivité durée et intensité de l'action	(Moore and Garg 1995)

Tableau 1 : Comparaison des méthodes d'évaluation des risques par observation les plus courantes dans la littérature

4 METHODES D'AUTO-EVALUATION

Les méthodes d'auto-évaluation ont été développées pour recueillir des données directement auprès des travailleurs en leur posant des questions sur leur santé et la perception des risques physiques au travail. Ces méthodes sont principalement utilisées dans des études visant à évaluer les facteurs de risque au travail et leur impact sur la santé des sujets. Lors d'études sur l'évaluation des risques ergonomiques au travail, un questionnaire d'auto-évaluation peut être utilisé pour identifier les différents facteurs de risque et leur impact sur la santé des travailleurs. Ces risques ergonomiques comprennent des risques physiques tels qu'une mauvaise posture, un effort important, des mouvements répétitifs et des levées de poids importantes (Yildirim et al. 2014). Des informations personnelles telles que l'âge, le sexe ou la taille sont également demandées lors d'un questionnaire d'auto-évaluation afin de mettre en évidence les liens entre ces informations et les syndromes musculo-squelettiques (Widanarko et al. 2015). Le questionnaire d'auto-évaluation peut également évaluer les facteurs de risque organisationnels et psychosociaux (Bugajska et al. 2013; Abubakar and Wang 2019) . Les avantages des méthodes d'auto-évaluation sont la possibilité d'effectuer une enquête sur une large population et de recueillir des données dans le temps. Dans la plupart des articles utilisant des méthodes d'auto-évaluation au cours d'une enquête ergonomique dans une industrie manufacturière, les questionnaires sont utilisés comme point de départ afin d'identifier la prévalence des symptômes de TMS dans la population étudiée. Toutefois, la fiabilité de ces enquêtes peut être altérée par les sentiments et les activités hors du travail des répondants et par une éventuelle mauvaise interprétation des questions (Barrero et al. 2009). Quelques exemples d'études utilisant la méthode d'auto-évaluation sont détaillés dans le tableau 2. L'un des questionnaires les plus fréquemment utilisés est le Questionnaire nordique musculo-squelettique qui recueille des données sur la douleur ressentie par les travailleurs au cours des sept derniers jours et des douze derniers mois pour chaque partie du corps, et les met en relation avec leurs informations personnelles (Kuorinka et al. 1987). Le questionnaire Karasek est une autre méthode d'auto-évaluation qui vise à mesurer le stress au travail en recueillant des données sur l'aspect psychosocial du travail (Karasek et al. 1998) .

Les questionnaires d'auto-évaluation sont également utilisés dans les études de cohortes médicales à grande échelle afin d'évaluer la prévalence des TMS dans la population générale et les facteurs de risque associés (CONSTANCES team et al. 2015).

Reference	Description de la méthode d'auto-évaluation	Population de l'étude	Risques de TMS mis en évidence
(Landau et al. 2008)	Évaluation de la population de travailleurs : âge, ancienneté, taille, IMC, satisfaction au travail et pression perçue.	Travailleurs dans l'industrie automobile (n=1700)	L'âge et la difficulté des tâches à effectuer
(Menzel et al. 2004)	Questionnaire mesurant la douleur/inconfort au travail au cours de la dernière semaine, son intensité et l'interférence avec la capacité à travailler.	Personnel infirmier (n=113)	Nombre de tâches à haut risque par heure, nombre de patients en surpoids et le statut d'infirmière.
(Widanarko et al. 2015)	Questionnaire sur les symptômes musculo-squelettiques pour chaque partie du corps selon l'âge et le sexe	Travailleurs sélectionnés au hasard en Nouvelle-Zélande (n = 3003)	Localisation du risque de TMS sur le corps en fonction des réponses aux questionnaires
(Márquez Gómez 2020)	Utilisation d'un questionnaire nordique standardisé afin de calculer la prévalence des troubles musculo-squelettiques	Travailleurs dans le découpage de viande (n = 174)	Risques à la fois physiques mais aussi psychologiques
(Acaröz Candan et al. 2019)	Utilisation du questionnaire musculo-squelettique nordique pour déterminer les symptômes des TMS pour chaque région du corps	Travailleuses dans une usine de décorticage de noisettes (n=162)	Ancienneté dans l'entreprise et mauvais résultats au questionnaire

Tableau 2 : Études utilisant les méthodes d'auto-évaluation

5 METHODES BASEES SUR LES MESURES

5.1 Méthodes de mesures directes

Les méthodes de mesure directe consistent à fixer des capteurs sur les segments du corps du sujet pour mesurer les variables d'exposition au travail (David 2005). Parmi les outils utilisés figurent l'électromyographie, les accéléromètres, les outils de mesure de force et la technologie de capture de mouvement, qui permet d'évaluer la contrainte d'exposition du sujet lors d'une opération technique. Alors que les deux autres méthodes de mesure des risques ergonomiques mesurent une approximation des risques physiques, les méthodes de mesure directe sont très précises et donnent des informations explicites sur l'exposition physique. Ces méthodes de mesures directes ont été, dans un premier temps, développées afin de mesurer les capacités des athlètes. Cependant, elles sont rarement appliquées dans l'industrie manufacturière car elles sont trop coûteuses à développer e et il est presque impossible de recueillir des données auprès d'une large population.
Ces méthodes sont également peu utilisées en pratique car elles mesurent une énorme quantité de données difficiles à traiter sur une courte période et la période étudiée n'est généralement pas assez longue pour montrer une exposition importante à un risque physique. En fait, cette précision de haute qualité n'est souvent pas nécessaire pour choisir une solution technique permettant de réduire le risque physique sur un poste de travail. Un autre inconvénient de ces méthodes est la difficulté de recueillir des données sur une longue période et le risque que les travailleurs portant l'appareil de mesure ne puissent pas effectuer la tâche pendant l'expérience comme ils le feraient en pratique.

5.2 Méthodes de mesures virtuelles

Traditionnellement, l'évaluation de l'ergonomie dans l'industrie est un outil utilisé pour identifier les domaines d'amélioration dans une situation de travail déjà existante. Cependant, une nouvelle tendance se dessine, au lieu de développer une solution pour alléger un risque physique pour l'opérateur de production, l'objectif est de prendre en compte les contraintes ergonomiques lors de la conception du poste de travail. Grâce aux outils de simulation numérique et de réalité virtuelle, il devient possible de prévoir un éventuel risque physique pour l'opérateur de production directement pendant la phase de conception du poste de travail (Micheli and Marzorati 2018). Les industries sont intéressées par l'intégration des contraintes ergonomiques directement dans la phase de conception du poste de travail, car cela coûterait moins cher que de prendre des mesures correctives pour alléger les contraintes physiques d'un poste de travail à l'avenir (Hu et al. 2011) et permettrait une intégration directe des facteurs humains au centre des décisions. La capture de mouvement est un outil prometteur pour mesurer les contraintes ergonomiques. Des méthodes de capture de mouvement basées sur des capteurs pour évaluer les contraintes ergonomiques ont commencé à être développées il y a 15 ans, mais cette méthode n'a pas encore fait son apparition dans l'industrie manufacturière car l'équipement est coûteux et considéré comme peu pratique pour les opérations de fabrication de processus (Oyekan et al. 2017). Plus récemment, des méthodes sans capteurs ont été mises au point et ont attiré l'attention des chercheurs. Un exemple d'outil utilisé est Microsoft Kinect, qui est dérivé du secteur des jeux (Bortolini et al. 2020).
Les technologies de capture de mouvement apportent une aide importante pour saisir et suivre les actions exactes effectuées au cours d'un processus de fabrication. Ces mesures peuvent être traitées afin de simuler virtuellement un jumeau numérique de l'opérateur de production dans un environnement de travail virtuel. Cette simulation peut déterminer les situations à risque selon des paramètres et des critères d'évaluation prédéterminés et peut être utilisée pour calculer l'impact d'une possible modification de l'environnement de travail. Dans l'industrie ces méthodes ne sont pas souvent exploitées, et le plus souvent à une échelle expérimentale. Cependant au fur et à mesure que cette technologie gagnera en maturité, nous pouvons nous attendre à un intérêt croissant de la part des entreprises de production dans les années à venir.

6 DISCUSSION

Les TMS se développent tout au long d'une vie, une preuve de la réduction des risques physiques et donc une réduction du risque de développer une maladie professionnelle grâce à un équilibrage des tâches est difficile à obtenir car elle nécessite une étude à long terme. Cependant, la perception des conditions de travail des opérateurs de production est un bon indicateur des avantages des méthodes de planification. Cela permet de montrer l'efficacité de ces méthodes d'optimisation à court et moyen terme. Dans la littérature, il existe plus d'une centaine de méthodes différentes identifiées pour mesurer les risques ergonomiques (Takala et al. 2010), en pratique ce nombre tend à augmenter car les experts de la santé peuvent adapter ces méthodes à leur situation exacte. Cependant, ces méthodes produisent souvent des résultats différents pour une même situation (Chiasson et al. 2012). Ces différences s'expliquent notamment par des écarts entre les seuils de pénibilité définis par les différentes méthodes d'évaluation ergonomiques. Certaines méthodes visent à mesurer l'importance des risques physiques, tandis que d'autres mesurent une valeur d'inconfort ou même la douleur liée au travail sur une période donnée. De plus, un autre aspect qui rend plus difficile cette étude est la marche de manœuvre que possèdent les travailleurs afin de réaliser leurs tâches. En effet le temps pour réaliser la tâche, l'espace disponible pour la réaliser ainsi que la charge mentale sont des facteurs qui influent directement sur la pénibilité de la tâche (Lanfranchi and Duveau

2008).Cette importante disparité dans les méthodes de mesure ergonomique se retrouve dans les données utilisées pour les différentes méthodes d'équilibrage du travail basées sur l'ergonomie utilisées dans la littérature (Otto and Battaïa 2017). Cette disparité rend également impossible une comparaison directe des différentes solutions énumérées. Cependant, l'avantage de disposer d'un large éventail de méthodes d'évaluation des risques ergonomiques est de permettre aux experts de la santé de choisir la méthode mieux adaptée à leurs besoins et aux contraintes de l'environnement dans lequel la mesure est effectuée. Cela donne la possibilité d'obtenir des données plus précises pour une éventuelle optimisation en tenant compte des données ergonomiques. Par ailleurs, l'état de santé d'un travailleur ainsi que le risque qu'il développe une TMS dépend d'un très grand nombre de facteurs qui sont souvent impossible à connaître quotidiennement. La fatigue, les facteurs psychosociaux sont des exemples de paramètres qui dépendent de la vie professionnelle mais également de la vie personnelle et il n'est donc pas possible de les connaître en temps réel sans demander directement au travailleur concerné et donc effectuer un questionnaire. Paradoxalement, dans le cadre de la 4e révolution industrielle, les méthodes d'évaluation de l'ergonomie les plus utilisées actuellement semblent être les questionnaires d'auto-évaluation et les méthodes d'observation, qui sont des méthodes plus traditionnelles que les méthodes de mesures virtuelles par exemple. Ce décalage avec le développement technologique s'explique par le coût élevé et le temps consacré aux outils de mesure les plus récents. Cette tendance peut également s'expliquer par le fait que les données ergonomiques sont difficiles à traiter et à utiliser dans les modèles mathématiques, et qu'elles augmentent considérablement la complexité de l'algorithme d'optimisation basé sur l'ergonomie.

En résumé, l'industrie 4.0 a pour objectif de prendre en compte les critères ergonomiques dans la gestion d'usine en temps réel, mais l'ensemble du processus n'est pas encore prêt. Les gestionnaires aimeraient disposer d'un outil intégré permettant de résoudre le problème d'optimisation en prenant en compte l'ergonomie de manière automatisée, mais, les mesures ne sont pas normalisées, la technologie n'est pas prête et les modèles sont trop complexes pour une intégration au cœur d'un système de production cyber-physique. Cette complexité s'explique par le nombre important d'aléas qui peuvent survenir en pratique (tâches non-finies dans les délais, pièces non livrées, défauts de fabrication, absence d'un travailleur…). La prise de décision par l'humain reste indispensable pour résoudre ces problématiques en temps réel sans interrompre la production. Par conséquent, la conclusion est que, pendant cette phase transitoire, il convient de se concentrer sur les outils d'aide à la décision visant à faciliter l'attribution des tâches aux opérateurs avec une évaluation de leurs contraintes passées.

7 CONCLUSION

Ce document propose une vue d'ensemble des différents outils utilisés pour effectuer des évaluations ergonomiques dans l'industrie manufacturière. Au fil des ans, de nombreux outils ont été mis au point, issus d'un large éventail de méthodes d'évaluation ergonomique. Sur le terrain, une évaluation ergonomique est souvent coûteuse car elle nécessite du temps et l'expertise d'ergonomes. Il est donc primordial d'avoir une bonne connaissance de l'environnement pour déterminer le cadre de l'étude et les risques potentiels. Ce large éventail d'outils explique la diversité des méthodes de mesure des données ergonomiques dans l'équilibrage des tâches basé sur l'ergonomie. Cependant, la complexité des algorithmes d'équilibrage de ligne prenant en compte ces contraintes empêche généralement les responsables d'intégrer ces calculs directement dans les systèmes de production de leurs ateliers. Par conséquent, des outils d'aide à la décision pourraient être développés afin de faire face à cette impasse technologique actuelle.

REFERENCES

Abubakar MI, Wang Q (2019) Key human factors and their effects on human centered assembly performance. International Journal of Industrial Ergonomics 69:48–57. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.09.009

Acaröz Candan S, Sahin UK, Akoğlu S (2019) The investigation of work-related musculoskeletal disorders among female workers in a hazelnut factory: Prevalence, working posture, work-related and psychosocial factors. International Journal of Industrial Ergonomics 74:102838. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.102838

Antwi-Afari MF, Li H, Edwards DJ, et al (2017) Biomechanical analysis of risk factors for work-related musculoskeletal disorders during repetitive lifting task in construction workers. Automation in Construction 83:41–47. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.07.007

Barrero LH, Katz JN, Dennerlein JT (2009) Validity of self-reported mechanical demands for occupational epidemiologic research of musculoskeletal disorders. Scand J Work Environ Health 35:245–260. https://doi.org/10.5271/sjweh.1335

Bautista J, Alfaro-Pozo R, Batalla-García C (2016) Maximizing comfort in Assembly Lines with temporal, spatial and ergonomic attributes. International Journal of Computational Intelligence Systems 9:788–799. https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1204125

Bevan S (2015) Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. Best Practice & Research Clinical Rheumatology 29:356–373. https://doi.org/10.1016/j.berh.2015.08.002

Boenzi F, Digiesi S, Facchini F, Mummolo G (2016) Ergonomic improvement through job rotations in repetitive manual tasks in case of limited specialization and differentiated ergonomic requirements. IFAC-PapersOnLine 49:1667–1672. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.820

Bortolini M, Faccio M, Gamberi M, Pilati F (2020)

Motion Analysis System (MAS) for production and ergonomics assessment in the manufacturing processes. Computers & Industrial Engineering 139:105485. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.046

Bugajska J, Żołnierczyk-Zreda D, Jędryka-Góral A, et al (2013) Psychological factors at work and musculoskeletal disorders: a one year prospective study. Rheumatol Int 33:2975–2983. https://doi.org/10.1007/s00296-013-2843-8

Chiasson M-È, Imbeau D, Aubry K, Delisle A (2012) Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders. International Journal of Industrial Ergonomics 42:478–488. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.07.003

CONSTANCES team, Zins M, Goldberg M (2015) The French CONSTANCES population-based cohort: design, inclusion and follow-up. Eur J Epidemiol 30:1317–1328. https://doi.org/10.1007/s10654-015-0096-4

David GC (2005) Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. Occupational Medicine 55:190–199. https://doi.org/10.1093/occmed/kqi082

Garg A, Boda S, Hegmann KT, et al (2014) The NIOSH Lifting Equation and Low-Back Pain, Part 1. Human Factors 23

Grosse EH, Calzavara M, Glock CH, Sgarbossa F (2017) Incorporating human factors into decision support models for production and logistics: current state of research. IFAC-PapersOnLine 50:6900–6905. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1214

Hellig T, Mertens A, Brandl C (2018) The interaction effect of working postures on muscle activity and subjective discomfort during static working postures and its correlation with OWAS. International Journal of Industrial Ergonomics 68:25–33. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.06.006

Hignett S, McAtamney L (2000) Rapid Entire Body Assessment (REBA). Applied Ergonomics 31:201–205. https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3

Hu B, Ma L, Zhang W, et al (2011) Predicting real-world ergonomic measurements by simulation in a virtual environment. International Journal of Industrial Ergonomics 41:64–71. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.10.001

Jaturanonda C, Nanthavanij S Heuristic Procedure for Two-Criterion Assembly Line Balancing Problem. 13

Karasek R, Brisson C, Kawakami N, et al (1998) The Job Content Questionnaire (JCQ): An instrument for internationally comparative assessments of psychosocial job characteristics. Journal of Occupational Health Psychology 3:322–355. https://doi.org/10.1037/1076-8998.3.4.322

Karhu O, Kansi P, Kuorinka I (1977) Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. Applied Ergonomics 8:199–201. https://doi.org/10.1016/0003-6870(77)90164-8

Koukoulaki T (2014) The impact of lean production on musculoskeletal and psychosocial risks: An examination of sociotechnical trends over 20 years. Applied Ergonomics 45:198–212. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.07.018

Kuorinka I, Jonsson B, Kilbom A, et al (1987) Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. Applied Ergonomics 18:233–237. https://doi.org/10.1016/0003-6870(87)90010-X

Landau K, Rademacher H, Meschke H, et al (2008) Musculoskeletal disorders in assembly jobs in the automotive industry with special reference to age management aspects. International Journal of Industrial Ergonomics 38:561–576. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.01.006

Lanfranchi J-B, Duveau A (2008) Explicative models of musculoskeletal disorders (MSD): From biomechanical and psychosocial factors to clinical analysis of ergonomics. European Review of Applied Psychology 58:201–213. https://doi.org/10.1016/j.erap.2008.09.004

Li G, Buckle P (1998) A Practical Method for the Assessment of Work-Related Musculoskeletal Risks - Quick Exposure Check (QEC). Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 42:1351–1355. https://doi.org/10.1177/154193129804201905

Márquez Gómez M (2020) Prediction of work-related musculoskeletal discomfort in the meat processing industry using statistical models. International Journal of Industrial Ergonomics 75:102876. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.102876

McAtamney L, Nigel Corlett E (1993) RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Applied Ergonomics 24:91–99. https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S

Menzel NN, Brooks SM, Bernard TE, Nelson A (2004) The physical workload of nursing personnel: association with musculoskeletal discomfort. International Journal of Nursing Studies 41:859–867. https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2004.03.012

Micheli GJL, Marzorati LM (2018) Beyond OCRA: Predictive UL-WMSD risk assessment for safe assembly design. International Journal of Industrial Ergonomics 65:74–83. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2017.07.005

Moore JS, Garg A (1995) The strain index: a proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. American Industrial Hygiene Association Journal

Moussavi SE, Zare M, Mahdjoub M, Grunder O (2019) Balancing high operator's workload through a new job rotation approach: Application to an automotive assembly line. International Journal of Industrial Ergonomics 71:136–144. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.03.003

Muramatsu R, Miyazaki H, Ishii K (1987) A Successful Application of Job Enlargement/Enrichment at Toyota. IIE Transactions 19:451–459. https://doi.org/10.1080/07408178708975419

Occhipinti E (1998) OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. Ergonomics 41:1290–1311. https://doi.org/10.1080/001401398186315

Otto A, Battaïa O (2017) Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey. Computers & Industrial Engineering 111:467–480. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.011

Otto A, Scholl A (2013) Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. OR Spectrum 35:711–733.

https://doi.org/10.1007/s00291-012-0291-6
Otto A, Scholl A (2011) Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. European Journal of Operational Research 212:277–286. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.056
Oyekan J, Prabhu V, Tiwari A, et al (2017) Remote real-time collaboration through synchronous exchange of digitised human–workpiece interactions. Future Generation Computer Systems 67:83–93. https://doi.org/10.1016/j.future.2016.08.012
Padula RS, Comper MLC, Sparer EH, Dennerlein JT (2017) Job rotation designed to prevent musculoskeletal disorders and control risk in manufacturing industries: A systematic review. Applied Ergonomics 58:386–397. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.07.018
Parot-Schinkel E, Descatha A, Ha C, et al (2012) Prevalence of multisite musculoskeletal symptoms: a French cross-sectional working population-based study. BMC Musculoskelet Disord 13:122. https://doi.org/10.1186/1471-2474-13-122
Roux CH (2005) Impact of musculoskeletal disorders on quality of life: an inception cohort study. Annals of the Rheumatic Diseases 64:606–611. https://doi.org/10.1136/ard.2004.020784
Sobhani A, Wahab MIM, Neumann WP (2017) Incorporating human factors-related performance variation in optimizing a serial system. European Journal of Operational Research 257:69–83. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.057
Takala E-P, Pehkonen I, Forsman M, et al (2010) Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work. Scand J Work Environ Health 36:3–24. https://doi.org/10.5271/sjweh.2876
van Tulder M, Malmivaara A, Koes B (2007) Repetitive strain injury. The Lancet 369:1815–1822. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)60820-4
Widanarko B, Legg S, Devereux J, Stevenson M (2015) Interaction between physical and psychosocial risk factors on the presence of neck/shoulder symptoms and its consequences. Ergonomics 58:1507–1518. https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1019936
Yildirim Y, Gunay S, Karadibak D (2014) Identifying factors associated with low back pain among employees working at a package producing industry. BMR 27:25–32. https://doi.org/10.3233/BMR-130415
Yoon S-Y, Ko J, Jung M-C (2016) A model for developing job rotation schedules that eliminate sequential high workloads and minimize between-worker variability in cumulative daily workloads: Application to automotive assembly lines. Applied Ergonomics 55:8–15. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.01.011

UN SYSTÈME SOCIO-CYBER PHYSIQUE BASÉ SUR UN RÉSEAU-INFOCENTRÉ POUR LA COLLECTE MOBILE DE SANG

Ikram Ghernaout [1], Linda Elmhadhbi[2]
[1]Université Abou Bakr Belkaid
Tlemcen, Algérie
ikram.ghernaout@univ-tlemcen.dz

Mohamed Hedi Karray[2], Bernard Archimede[2]
[2] Université de Toulouse, INP-ENIT
Tarbes- France
nom.prénom@enit.fr

RÉSUMÉ : *La collecte du sang est organisée par des centres de transfusion sanguine (CTSs) dont l'objectif est de recueillir la quantité de sang nécessaire pour répondre à la demande. Actuellement, les quantités de poches de sang collectées au niveau d'un centre de transfusion sanguine (CTS) restent insuffisantes face à l'importance de la demande. Pour y faire face, certains CTSs, en collaboration avec des associations, ont souvent recours à la collecte mobile du don de sang qui offre l'avantage d'augmenter les niveaux de collecte de sang pour arriver à satisfaire les besoins nationaux, de par la diversité des emplacements qui permet d'être le plus proche possible de la population, et des quantités de sang qui peuvent être collectées. Toutefois certains paramètres doivent être considérés dans ce processus de collecte qui reste traditionnel et non digitalisé, ce qui peut limiter la prise de décision dans le choix des différents emplacements du centre mobile, mais aussi dans la connaissance de la capacité de ses ressources et du temps d'attente parfois trop long pour les donneurs de sang. Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthodologie qui consiste à digitaliser le processus de collecte mobile, à rendre le système plus intelligent pour une meilleure planification de la collecte en se basant sur un système socio-cyber physique (CPSS) qui s'inspire de l'approche réseau infocentré (centric network). Le défi à travers cette méthodologie est de rendre le processus de décision plus intelligent en ce qui concerne le choix des éventuels emplacements de collecte, et le partage de l'information avec les donneurs potentiels.*

MOTS-CLÉS : **système cyber-physique, réseau infocentré, système d'aide à la décision, ontologies, collecte mobile du don de sang.**

1 INTRODUCTION

Le sang humain est un élément essentiel pour la vie humaine. Des milliers de vies sont sauvées grâce à la seule source d'approvisionnement qu'est le don de sang bénévole. Cependant, selon l'organisation mondiale de la santé (OMS), plusieurs pays sont constamment confrontés à une insuffisance de sang due à une incapacité de fidéliser un grand nombre de donneurs. En effet, les quantités de poches de sang collectées au niveau des centres de transfusions sanguines (CTSs) restent insuffisantes face à l'importance de la demande qui augmente d'année en année. Pour y remédier, la collecte du sang mobile reste le seul moyen pour accueillir et sensibiliser de nouveaux volontaires.

La chaîne logistique sanguine, passe par plusieurs étapes allant du donneur au receveur. Elle peut être en effet subdivisée en quatre phases : la collecte, la production, l'inventaire et la distribution.

Dans la première étape, l'approvisionnement en sang a pour objectif d'obtenir la quantité de sang souhaitée. Le donneur de sang, volontaire, se voit prélever du sang soit dans un centre de collecte fixe ou permanent se trouvant majoritairement au sein d'un hôpital, soit dans un centre de collecte mobile qui consiste en un camion contenant tout le matériel nécessaire pour effectuer des collectes de sang. Quel que soit le mode d'approvisionnement, les donneurs suivent le même processus.

Les prélèvements obtenus sont par la suite envoyés dans une zone d'analyse pour y être triés et stockés avant d'être livrés à un établissement demandeur en vue d'être en dernier lieu transfusé à un malade.

Un centre de collecte fixe représente moins de 15% de la collecte de sang et a un coût d'installation plus important, qu'un centre de collecte mobile qui représente plus de 85% de la collecte de sang (Alfonso et al., 2013). Dans le cadre mobile, les changements d'emplacement ne nécessitent pas un coût important ce qui facilite le don en réduisant la distance parcourue par les donneurs. Ils permettent par ailleurs de maximiser le nombre des donneurs potentiels en sélectionnant les bons emplacements. La collecte est donc une étape importante de la chaîne logistique sanguine, ce qui nous amène à nous focaliser sur ce mode de collecte, qui offre plus de possibilités à la fois dans la diversité des emplacements et dans les quantités de sang qui peuvent être collectées de façon à garantir l'autosuffisance et de répondre efficacement à la demande.

Au-delà des réticences vis-à-vis de l'acte de don, ce mode de collecte, présente des points critiques qui sont principalement la distance, le temps d'attente et la capacité des ressources (humaines et matérielles). Plus précisément, les donneurs sont particulièrement sensibles à la dimension de distance. Le temps nécessaire pour effectuer le trajet peut avoir un impact négatif sur la décision de donner de son sang. Le don de sang requiert également un temps souvent très important qui cumule le temps d'attente possible avant le don, le temps de repos nécessaire après le don, et le temps de la prise en charge par l'équipe organisant la collecte. Ces différents temps sont souvent perçus comme trop longs (environ 1 heure),

ce qui exige aux donneurs potentiels de faire un effort important pour se rendre disponible et pour se déplacer sur le lieu de collecte. Il est à noter, en plus, que les donneurs peuvent attendre leur tour dans des conditions climatiques souvent difficiles. Ces différents aspects, associés à l'acte de don, accroissent le sentiment d'inconfort, compliquent le don, et peuvent mener à l'abandon du donneur. Enfin, il est très important de bien identifier et mobiliser les ressources nécessaires afin de satisfaire les exigences des donneurs et de la collecte, de bien répartir le personnel (docteurs, infirmier(ères), administration), et le matériel (fauteuils, poches de sang, appareils de prélèvements).

Prenant en compte ces constats, notre travail se focalise sur les challenges suivants:

- Identifier l'emplacement adéquat des centres de collecte mobile afin de faciliter l'accès aux donneurs et ainsi accéder au plus grand nombre de personnes,
- Identifier les meilleurs créneaux horaires où se trouvent la majorité des donneurs qui permettront de planifier et d'étaler leur présence,
- De réduire la distance par rapport à leurs positions d'une part, et de minimiser le temps du processus de don puis de minimiser le temps d'attente trop longs d'autre part,
- Maximiser la quantité de sang collectée avec une stratégie de ciblage des donneurs potentiels.

Pour répondre à ces préoccupations, il est essentiel de comprendre le déroulement traditionnel de la collecte y compris le processus de décision du choix d'emplacement et de diffusion de l'information. Actuellement, les associations ou établissement concernées par le don de sang vont à la rencontre des donneurs de sang dans les communes où il n'y a pas un CTS proche, dans les entreprises, ou les établissements universitaires afin de collecter le maximum de sang. Après avoir défini l'emplacement de la collecte mobile, l'établissement annonce aux donneurs le lieu, ainsi que les dates et les horaires de la collecte. Les donneurs sont informés à l'aide d'affiches dans les lieux de groupement, via la radio, via les réseaux sociaux dans certains cas. Malgré l'effort et l'engagement des établissements cela reste insuffisant face à l'importance de la demande. Ce processus de collecte traditionnel n'est pas totalement digitalisé, ce qui limite la visibilité pour bien décider du cadre spatio-temporel d'une campagne de collecte ainsi que le cadre de diffusion ciblé de l'information.

Nous pensons que le choix du lieu et des horaires de collecte ainsi que le ciblage de certaines personnes pour une campagne de collecte, est un processus de décision complexe qui nécessite d'être dirigé par plusieurs critères et combinant plusieurs données. Parmi ses données on peut citer l'historique des donneurs, les heures de pointes et la concentration des personnes dans chaque emplacement géographique, les conditions météorologiques, les événements socio-culturel auquel il y aura une concentration ou un flux important de personnes.

L'objectif de ce travail est de présenter les grandes lignes et orientations vers une méthodologie de digitalisation du processus de collecte de sang et de la prise de décision par la collecte, l'analyse et l'exploitation des données.

La nature du processus de collecte mobile de sang et celui de décision envisagé nous oriente vers une digitalisation selon une architecture d'un système socio-cyber-physique (CPSS).

Un CPSS est un système informatisé, connecté et intelligent qui intègre et unifie l'informatique, les communications et les systèmes de contrôle. Il s'est développé pour intégrer des processus physique et social réels et des processus informatiques virtuels, d'extraire des informations du monde physique et social puis de traiter ces informations dans le cybermonde (cpsweek, 2014). En général, un CPSS comprend trois espaces ; l'espace physique, l'espace social, et l'espace cyber.

L'espace physique regroupe les composants physiques, par exemple des capteurs utilisés comme source de données. L'espace social inclut l'humain d'une certaine manière, soit comme source de données, soit comme acteur ou décideur. L'espace Cyber ou le Cyber monde, c'est l'espace dans lequel les systèmes informatiques fonctionnent en réseau pour traiter les données venants des autres espaces.

Afin de gérer et consolider les flux des données qui transitent entre les différents espaces, nous nous sommes inspirés des réseaux infocentrés, habituellement utilisés par les armées pour la gestion opérationnelle des combats, afin de concevoir un réseau infocentré adapté au CPSS de collecte mobile de sang.

La suite de cet article est organisée comme suit : dans la section 2, nous présentons l'état de l'art sur le système cyber physique dans le contexte de la collecte du sang. Dans les sections 3, 4, 5 et 6 nous décrivons en détails la solution proposée. Enfin, la conclusion et les travaux futurs sont présentés dans la section 7.

2 ETAT DE L'ART

2.1 *Collecte du sang*

De nombreux travaux ont été proposés dans la littérature dans le contexte de collecte du sang. Ces études se concentrent sur divers aspects, tels que la collecte, la gestion des stocks, la distribution de sang. Cependant, si la littérature sur la chaîne logistique sanguine est étendue, celle sur les systèmes de collecte de sang est rare. Beliën et Forcé (2012) ont présenté une revue de la littérature sur la gestion des stocks et de la chaîne logistique sanguine. Ils reportent que le nombre de publications montre que la gestion des stocks de sang est au premier rang des préoccupations, alors que la planification de la collecte de sang est en bas de l'échelle. Alfonso et al (2013) ont utilisé des modèles de réseaux de petri convertis en simulations à l'aide du logiciel ARENA. Des plans expérimentaux appropriés et des analyses coût-efficacité ont été utilisés et évalués sous plusieurs scénarios pour déterminer les meilleures configurations des systèmes de collectes. Ils ont proposé différents scénarios pour accueillir des donneurs aux centres de collectes fixes et mobiles, afin de répondre aux attentes des donneurs, assurer un don régulier et éviter l'abandon des donneurs et

ainsi gérer les flux des donneurs. Pour ce faire la probabilité de temps d'attente et d'abandon des donneurs ont été défini en identifiant des indicateurs axés sur les flux des donneurs et la capacité adéquate en ressource humaines, d'autres paramètres comme les conditions d'attente et la distance n'ont pas été pris en considération. Zahiri et al. (2015) ont présenté un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers, le modèle a pour but d'aborder des décisions de localisation stratégique et tactique des centres de collectes de sang fixes et mobiles ; avec une approche de paramètres flous, pour la conception d'un réseau de collecte et de distribution, l'objectif a été de minimiser le coût total, y compris le coût de localisation, de délocalisation des centres mobiles plus le coût de transport, les auteurs se sont plus focalisés sur l'aspect localisation et distance par rapport aux donneurs mais n'ont pas pris en considération plusieurs paramètres comme l'aspect social des donneurs. Ramezanian et Behboodi., (2017) ont exposé un modèle déterministe de localisation-allocation en adaptant une optimisation par programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) avec la prise en compte des aspects sociaux comme la distance, l'expérience des donneurs, les mesures prises pour inciter les non-donneurs à donner, et l'accueil de l'équipe médical sont considérés comme des facteurs de motivation, le but du modèle a été de minimiser les coûts de la chaîne logistique sanguine, et d'affecter les donneurs aux centre de collecte le plus proche. Osorio et al., (2018) ont proposé un modèle mathématique de localisation-allocation. Cette approche soutient à différents niveaux de centralisation des décisions stratégiques telles que le nombre optimal des centres de collecte, de production et de distribution, à y affecter les hôpitaux afin de minimiser le coût total du système, le but à été d'aider les décideurs à trouver une configuration optimal pour la chaîne logistique sanguine, en conséquence, ils ont constaté que la centralisation au stade de la collecte est intéressante en fonction de l'accessibilité, puis pour la production par rapport à l'accès aux routes, enfin pour les centres de distribution dans la réduction du stock de sécurité. D'autre part, Piraban et al. (2019) ont analysés et classés une revue de littérature sur les études publiées entre 2005 et février 2019 portant sur la chaîne logistique sanguine selon une nouvelle taxonomie basée sur les principaux aspects de cette chaîne logistique. Cette présentation détaillée de l'état de l'art sur chaque processus de la chaîne logistique sanguine a donner lieu à certaines orientations pour des recherches futures comme par exemple prévoir et gérer des données ou envisager des configurations plus complexes de la chaîne logistique sanguine.

2.2 *Système socio-cyber physique (CPSS)*

En 2008, la Fondation nationale des sciences des États-Unis (NSF) a identifié le système cyber-physique (CPS) comme étant un domaine de recherche clé Wang et al., (2011). La notion de système cyber-physique social (CPSS) ajoute des ressources et une dimension sociale à cette intégration Shi et al., (2011). Ce système relie le monde computationnel virtuel au monde physique, et considère l'être humain comme partie intégrante du système. Il transforme la manière dont nous interagissons avec le monde physique qui nous entoure et intègre des dispositifs physiques tels que les capteurs qui sont capables de collecter des informations vitales contenant des données, et des composants cybernétiques pour former un système analytique qui réagit intelligemment aux changements dynamiques des scénarios du monde réel.

Bien que de nombreuses architectures CPS aient été proposées dans la littérature, celles proposées pour les applications de santé restent très peu nombreuses Lee et al., (2012). Hu et al. (2012) ont proposé une architecture orientée services (SOA) basée sur le concept médical CPS. Cependant, le principal avantage de cette architecture est la flexibilité d'intégration des services et des composants. Haque et al. (2014) ont présenté une étude sur les applications des CPS dans les soins de santé. Une taxonomie complète, qui caractérise et classifie les différents composants et méthodes nécessaires à l'application des CPS dans les soins de santé a été également fournie. Zhang et al. (2015) ont proposé un système cyber-physique pour les applications et services de soins de santé centrés sur le patient, appelé Health-CPS, basé sur les technologies d'analyse cloud et big data, dont l'objectif est de rendre le système de santé plus performant afin que l'humain puissent ensuite bénéficier de services de santé intelligents et de diverses applications. Stankovik (2016) a présenté des questions de recherche et des orientations prometteuses pour les CPS de soins de santé. Il a constaté que le déploiement des CPS de santé peut devenir un nouvel instrument médical et peut fournir des données pour la création de nouveaux modèles de comportement humain et de santé. Wu et al, (2017) ont proposé un nœud de capteur portable avec collecte d'énergie solaire et transmission Bluetooth basse énergie (BLE) qui permet la mise en place d'un WBAN (Wireless Body Area Network) autonome dans le système de santé et qui sont placés dans différentes positions du corps. Une application web pour smartphone a été conçue pour afficher les données des nœuds de capteurs et envoyer des notifications d'urgence. Le but de ce système est de mesurer des signaux physiques tels que la distribution de la température et la fréquence cardiaque Il peut également détecter les chutes en utilisant l'accéléromètre du nœud pour la notifier les services de secours. Dey et al. (2018) ont proposé le système MCPS (Medical cyber-physical systems) et leurs rôles dans les soins de santé. La structure de ce système permet une communication rapide entre les patients, les médecins et le personnel des organisations de santé, de plus il permet de transférer facilement les enregistrements des patients et les dossiers, des défis posés par les MCPS pour les futurs dispositifs médicaux sont abordés de manière à accroître l'efficacité, la qualité et la sécurité des soins de santé.

2.3 *Réseau infocentré*

Le réseau infocentré connu sous le terme anglais *« centric network »* est un concept utilisé généralement par les armées qui exploitent les systèmes informatiques en réseau pour la gestion stratégique, tactique et opérationnelle des batailles. Il s'agit de consolider des informations de différentes sources et de les partager pour une exploitation en temps réel.

Anand et al., (2018) ont présenté les concepts, les méthodologies, et les technologies dominantes des NCW (Network centric warfar), ainsi que les avantages et défis rencontrés par ces derniers dans les guerres modernes. Ils ont démontré que l'efficacité des réseaux infocentrés a été amplement démontrée par les États-Unis et leurs alliés lors de leurs opérations en Irak et en Afghanistan. En effet, des missions stratégiques, opérationnelle et tactique sont établis grâce à un réseau solide qui permet de mettre en relations les différents éléments du réseau.

Sauter et al. (2014) ont étudié comment les médecins en premières lignes (premiers soins) peuvent travailler en réseau avec d'autres prestataires de soins sur la base du partage d'information sur les patients à travers un réseaux infocentré.

3 VERS LA DIGITALISATION DU PROCESSUS DE COLLECTE DE SANG

La digitalisation du processus de collecte mobile de sang a pour objectif de fournir un système intelligent de gestion de collectes ayant les capacités de comprendre et de traiter les informations issues de différentes sources et de tout format. Ainsi, les données numériques seront plus facilement collectées, exploitées, partagées car elles vont être plus accessibles. Digitaliser le processus de collecte permettra de récupérer les données nécessaires issues du camion mobile, ainsi que celles concernant la population et la société. Ces données peuvent être enrichies par des données externes, entraînant une exploitation massive des données existantes.

Pour atteindre ces capacités dans ce système digitalisé, les CPSS semblent être une solution prometteuse de par l'intégration du monde physique et du monde cybernétique et en raison de plusieurs avantages comme la capacité de calcul ou la quantité d'informations qui peuvent être générées, collectées et traitées. Rendre le camion intelligent en l'équipant de différents types de capteurs, permettra de connaître le nombre de personnes qui attendent à l'extérieur, de savoir en temps réel la disponibilité d'une chaise, du stock de poches de sang, etc. Exploiter les données météorologiques aidera par ailleurs à décider du positionnement du camion de collecte mobile. En effet, la prise de décision consiste à exploiter et à analyser les données corrélées afin de prendre de meilleures décisions plutôt que de prendre des décisions intuitives ou fondées uniquement sur l'observation limitée des expériences passées. Par exemple, afin de décider du nombre de fauteuils à installer dans le camion mobile, il est intéressant d'étudier les données des dernières collectes. Si lors d'une collecte précédente on constate que le temps moyen d'attente était d'une heure pour 100 donneurs, on peut en déduire que ce délais est causé par le manque de ressources mobilisées (e.g. mobilisation de deux fauteuils et 1 infirmière uniquement). Il serait donc intéressant de mobiliser 4 fauteuils pour une prochaine collecte ciblant la même population de donneurs pour réduire leurs temps d'attente afin de les fidéliser et aussi recruter de nouveaux donneurs ou encore envisager de déplacer le camion sur un autre emplacement sur le temps gagné.

Dans le but d'automatiser la collecte et l'exploitation des données nécessaires pour la prise de décision, et ainsi de rendre le processus de collecte de sang plus intelligent nous envisageons l'utilisation d'un système socio-cyber physique (CPSS).

4 UN SYSTÈME SOCIO-CYBER PHYSIQUE (CPSS) POUR LA COLLECTE MOBILE DU DON DE SANG

Pour résoudre les problématiques identifiées et pour améliorer le processus de collecte mobile de sang, nous proposons un système socio-cyber physique dirigé par un réseau infocentré.

Dans ce qui suit, on va s'intéresser à comment concevoir le système cyber physique de collecte mobile de sang (Figure 1). D'abord, d'une part, on a l'espace réel qui comporte le système physique et social. Premièrement on a les différents acteurs de notre système qui sont les établissements et les donneurs. Deuxièmement on a les systèmes physiques comme le camion mobile, les ressources médicales et les capteurs intelligents (e.g. capteurs de présences, capteurs d'occupation de sièges, etc.). Pour rendre le processus intelligent, il s'agit d'introduire un ensemble de capteurs tels que;

- Un capteur à l'extérieur du camion pour collecter le nombre des donneurs dans la file d'attente.
- Des capteurs sur les fauteuils pour savoir le nombre de personnes qui occupent ces derniers, de même pour connaître le temps entre deux processus de collecte.
- Des capteurs pour les ressources afin de connaître leurs disponibilités.

Ainsi, il serait envisageable d'introduire un module pour récupérer les conditions météorologiques pour considérer la météo autour du centre de collecte mobile et un module GPS pour localiser les positions des donneurs potentiels par rapport à la position du camion.

D'autre part, l'espace cyber décrit le monde virtuel qui constitue un univers d'information et une multitude de protocole de communication, il permet de collecter et stocker les données des capteurs, ainsi que de les analyser.

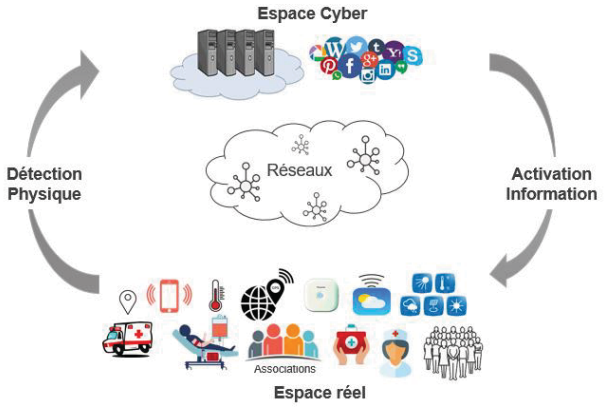


Fig 1. Système socio-cyber physique pour la collecte de sang mobile

5 *ARCHITECTURE GLOBALE DU CPSS*

Pour mieux comprendre l'interaction des différents espaces et leurs fonctionnalités, on propose dans ce qui suit l'architecture globale et détaillée de notre système cyber physique social de collecte du sang. L'architecture de notre système se présente en trois parties ; social, physique et cyber (Figure 2).

L'espace « social », est composé principalement par les usagers du système à savoir les associations médicales, le staff médical et les donneurs qui deviennent des acteurs du processus de collecte. Cet espace, est alimenté par des sources de données telles que les réseaux sociaux, les événements sociaux culturels, et communautaires (e.g. Étudiants, sportifs, etc.).

L'espace « physique » est constitué des camions de collecte munis de capteurs intelligents.

L'espace « cyber » est dédié à la gestion de l'information issue des espaces « physique » et « social ». Il est organisé autour de cinq sous-espaces. Le sous-espace « Données » a pour objectif de collecter et stocker les flux de données. Le sous-espace « modèles sémantiques » s'intéresse à la formalisation du domaine et des composants du système et de leur interaction, de concevoir une ontologie fédérative comme solution afin d'assurer une interopérabilité sémantique entre les différents espaces d'informations, en effet nous proposons une ontologie une ontologie modulaire constituée d'un module qui définit les ressources (i.e. infirmière, médecin, camion, poche de sang, chaise), un module lié aux informations des donneurs (i.e. informations personnelles, dossier médical, localisation GPS), un module dédié à la météo (i.e. le temps qu'il fera le jour x). Le sous-espace « intégration sémantique » a pour vocation d'intégrer et de lier les données collectées de différentes sources selon l'ontologie fédérée élaborée dans le sous espace « modèles sémantiques » en générant un graphe de connaissances. Le sous-espace « traitement des données » analyse le graphe de connaissances à l'aide de technique d'intelligence artificielle en vue d'extraire des connaissances implicites à partir de ces données. Enfin, Le sous-espace « application » est composé de cinq services associés chacun à une étape du processus digitalisé de collecte mobile.

- Le premier service assiste les institutions de collecte de sang dans la prise de décision, en se basant sur les données provenant des espaces physiques et sociaux en particulier les données les donneurs ciblés. L'objectif est de sélectionner la meilleure localisation et le meilleur créneau horaire afin d'installer le camion mobile.
- Le deuxième service diffuse une information ciblée à destination des donneurs potentiels via les réseaux sociaux afin de les informer du lieu et de la date de la collecte.
- Le troisième service optimise l'allocation des ressources humaines et matérielles tenant compte de contexte de collecte et des prévisions sur le nombre de donneurs.
- Le quatrième service planifie en temps réel les actes de prélèvement en effectuant une gestion interactive des flux de donneurs afin de minimiser leurs temps d'attente.
- Enfin, le dernier service assure un interfaçage digitalisé avec les usagers afin de faciliter la collecte et l'enregistrement lors de chaque passage des informations nécessaires issues des donneurs tel que renseigner le questionnaire préalable au don.

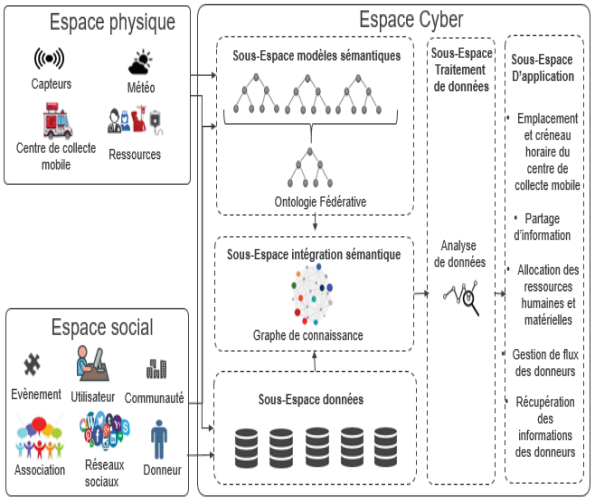


Fig 2. CPSS pour la collecte de sang mobile

6 *RÉSEAU INFOCENTRE POUR LA COLLECTE MOBILE DE SANG*

Afin de lier les différents espaces du CPSS nous proposons d'appliquer l'approche du réseau infocentré (Centric Network) dans le contexte de la collecte mobile du don de sang. Cette approche permet de récupérer, de relier, d'exploiter et de partager des informations afin d'accroître la rapidité et la précision de la prise de décision. Ceci va assurer le partage d'information entre les différents espaces physique, social et cyber pour une prise de décision de façon plus éclairée. Aussi, ceci va permettre l'intégration de toutes les parties prenantes du processus de collecte mobile, ainsi que la corrélation et l'échange des informations pour la prise de décision concernant le déploiement opérationnel de la collecte mobile. Comme indiqué dans la (figure 3), ce réseau infocentré est composé de 4 couches ou niveaux.

Le premier niveau représente le niveau informationnel. Il est constitué des différentes sources de données qui alimentent le réseau et qui sont principalement les éléments des espaces physique et social. Le deuxième niveau représente la corrélation (inter-relation sémantique) des données dans un format interopérable et exploitable comme une source unique. Ensuite, le troisième niveau représente le niveau stratégique et tactique. Dans cette couche s'effectue l'analyse des données corrélées pour étudier les différents scénarios d'emplacements de la collecte mobile, identifier et cibler les différents donneurs potentiels, et gérer l'allocation des ressources selon un contexte défini. Enfin, le plus haut niveau représente le déploiement opérationnel. Il s'agit de la mise en place et le monitoring en temps réel du processus de collecte en suivant le déploiement du camion mobile, la mobilisation des donneurs mobilisés, et le déroulement de la collecte. En fonction de ce suivi du déroulement du processus, et de la projection par rapport aux données en temps réel, des ajustements peuvent être appliqués sur le processus en ce qui concerne l'emplacement ou encore sur la stratégie de ciblage et d'incitation des donneurs (e.g. envoi de sms, informer les donneurs potentiels des temps d'attentes, etc.).

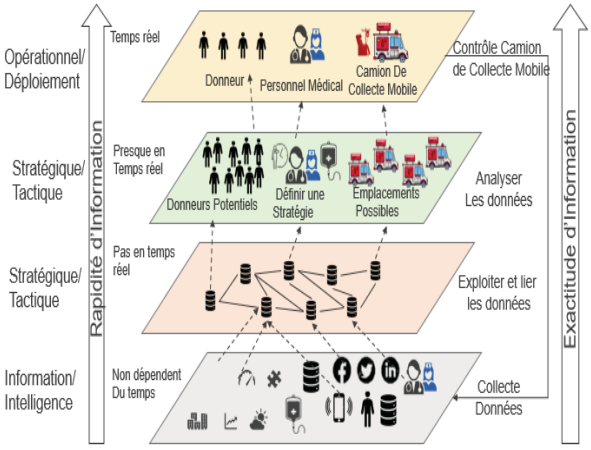


Fig 3. Réseau infocentré pour la collecte de sang mobile

7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La planification de la collecte du don du sang représente la phase la plus complexe de la chaîne logistique sanguine. Ceci est dû essentiellement au caractère incertain du nombre de donneurs de sang et des besoins qui ne cessent de croître chaque année. Pour ce faire les centres de transfusion sanguine (CTSs) se reposent principalement sur les campagnes de collectes mobiles du don du sang afin de répondre à la demande. Cette particularité de se déplacer et de se situer dans divers sites de prélèvement, offre l'avantage de bénéficier d'un contact proche de la population et des donneurs potentiels. Toutefois, à l'heure actuelle le processus n'a toujours pas été digitalisé, ce qui limite le processus de décision pour le choix des emplacements et de donneurs cibles. Compte tenu de cela et dans la perspective d'améliorer ce processus, dans cet article nous proposons une méthodologie de digitalisation du processus de collecte. Cette méthodologie s'appuie sur un système socio-cyber physique basé sur l'approche réseau infocentré.

Cette proposition, oriente notre réflexion sur les challenges à adresser dans le futur proche pour la concrétisation de ce système. Notamment, des challenges liés aux données, à la collecte, à la corrélation sémantique et à l'utilisation des données privées des donneurs et des challenges concernant la gestion dynamique des flux et des ressources en temps réel.

- Une des pistes envisagées, sera d'élaborer une application mobile ad-hoc à la disposition des donneurs comme composante du CPSS.
- De modéliser les processus de collecte via l'ontologie proposée avec le système **Protégé** et poser un diagnostic dans implémentation de ce système.

RÉFÉRENCES

Alfonso, E., Xie, X., Augusto, V., & Garraud, O. (2013). Modelling and simulation of blood collection systems: improvement of human resources allocation for better cost-effectiveness and reduction of candidate donor abandonment. Vox Sanguins, 9, 225–233. https://doi.org/10.1111/vox.120012013 IEEE International Conference on, Madison, WI, August 17–20.

Anand, D., Raja, C., & Rajan, E. G. (2018). Network Centric Warfare- Concepts and Challenges. August, 3–8.

Beliën, J., and H. Forcé, Supply chain management of blood products: A literature review European Journal of Operational Research, vol 217, no 1, pages 1 16, 2012.

"Cyber-Physical Systems Week" [Online]. Available: http://www.cpsweek.org/ [Accessed: May. 1, 2020].

Dey, N., Ashour, A. S., & Fong, S. J. (2018). Medical cyber-physical systems: A survey. 1–13.

Haque, S. A., Aziz, S. M., & Rahman, M. (2014). Review of cyber-physical system in healthcare. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014.

Hu, L., and N. Xie, Z. Kuang, and K. Zhao, "Review of cyber-physical system architecture," in Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real- Time Distributed ComputingWorkshops,2012

Liang, C., Yu, F. R., & Zhang, X. (2015). Information-Centric Network Function Virtualization over 5G Mobile Wireless Networks. June, 68–74.

Osorio, A. F., Brailsford, S. C., Smith, H. K., & Blake, J. (2018). Designing the blood supply chain: how much, how and where? Vox Sanguinis, 113(8), 760–769.

Ramezanian R, Behboodi Z: Blood supply chain network design under uncertainties in supply and demand considering social aspects. Transport Res E Log 2017; 104:69–82.

Stankovic, J. A. (2017). Research directions for cyber physical systems in wireless and mobile healthcare. ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, 1(1), 1–12.

Sauter, S. K., & Neuhofer, L. M. (2014). Analyzing healthcare provider centric networks through secondary use of health claims data Analyzing Healthcare Provider Centric Networks through secondary use of health claims

Shi, J., and J. Wan, and H. Yan, A survey of cyber-physical systems, in Proceedings of Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2011 International Conference on, 2011, pp. 1–6.
Vasilakos, A. V, Li, Z., Simon, G., & You, W. (2015). Journal of Network and Computer Applications Information centric network: Research challenges and opportunities. Journal of Network and Computer Applications, 52, 1–10.
World Health Organization WHO Towards 100% voluntary blood donation: a global framework for action Geneva: World Health Organization, 2010.
Wang, J., and H. Abid, S. Lee, L. Shu, andF.Xia,"A secured health care application architecture for cyber-physical systems," Control Engineering and Applied Informatics,vol.13, no.3,pp. 101–108, 2011.
Zahiri, B., Torabi, S.A., Mousazadeh, M., Mansouri, S.A., 2015. Blood collection man- agement: methodology and application. Appl. Math. Modell. 39 (23–24), 7680– 7696.
Zhang, Y., Qiu, M., Member, S., & Tsai, C. (2015). Health-CPS: Healthcare Cyber-Physical System Assisted by Cloud and Big Data. 1–8.

A COLLABORATIVE SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN WITHIN A TERRITORY HOSPITAL GROUP

Khouloud Dorgham, Issam Nouaouri, Jean-Christophe Nicolas and Gilles Goncalves
Univ. Artois, ER 3926, LGI2A, Béthune, F-62400, France
khouloud.dorgham@univ-artois.fr

ABSTRACT : *The management of logistics functions is essential for the overall good functioning of a health-care establishment to meet the efficiency and the effectiveness requirements that hospitals are increasingly faced with. Minimizing spending is currently leading health-care establishments to reason and optimize the physical flows in terms of the overall performance of their supply chains. Therefore, logistics pooling could be seen as a solution for hospitals to reduce costs and enhance the quality of service. In this work, linear programming (LP) model was proposed to design a shared hospital supply chain among various establishments of a "Territory Hospital Group" based on a horizontal collaborative logistic strategy. The objective is to rationalize, pool, and optimize the storage and the distribution of products between suppliers, warehouses, and cross-docks. Instances with small and medium sizes were generated based on a real situation and several tests were developed on different hypotheses to reveal the impact of the proposed logistics collaboration on economic costs.*

KEYWORDS : *Optimization, horizontal collaboration, hospital supply chain, logistics pooling*

1 INTRODUCTION

In recent decades, the grouping of establishments or communities (university communities, etc.) is becoming of great importance, and several research studies aimed at promoting new models of territorial organization in different areas of real life. Since July 2016, hospitals in France were also affected by this grouping, cause medical sector has been faced new challenges and issues that obliges to re-organize the activity of its different functional units. Encountered with these deep changes, it is essential to revise the structure of the health-care system in order to optimize the resources mobilized and control spending Pillay (2008).

Therefore, in the interest of enhancing hospital logistics (managing products and material flows and distribution circuits), France hospitals have met to form Territorial Hospital Groups (THG) that vary mainly according to their establishment's parties, their budget, and the territories served. This reform aimed at pooling progressively certain support functions provided by the establishment such as logistic management and increasing cooperation between hospitals. Following other sectors, collaboration strategy will be advantageous through an overall cost reduction, a supplier integration, and an optimization of processes such as storage of products in warehouses and pharmacies and their distribution to care units. Hence, to model this collaboration, mastery of logistics functions is essential for the overall good functioning of the hospital supply chain.

Generally, in a classic supply chain, every single hospital must review, release, treat, and monitor its supply cycle individually. The supplier's organization responds to this operation and must meet the unit care specifications. In this work, a linear programming model was proposed, at the strategic level of decision making, to design a pooled hospital supply chain among various establishments of a territory hospital group based on a horizontal collaborative logistic strategy.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 reviews the literature on collaborative logistics network design problems with different real-word applications domains and methodologies. Section 3 presents a description of the proposed problem and its mathematical formulation. In the fourth section, several instances were generated to demonstrate the pooling performance. Finally, Section 5 presents a conclusion with some future research studies.

2 Literature review

According to Moutaoukil et al. (2013), collaboration strategy consists to share logistics means and resources in order to minimize costs and increase profits, it could be either on a vertical or horizontal level. The first type concerns partners who belong to the same logistics chain that operates at different levels of the supply network. Unlike the second

type, that concerns partners of the same level who do not belong to the same logistics chain. Several collaborative supply chain design problems and models have been developed in the literature dealt with the design of a shared logistics network Mrabti et al. (2019) to increase the efficiency of the supply chain and achieve economies of scale in a different real-world domain (agronomy, automobile, etc.) and for all decision-making levels. In this section, we identified different research studies belonging to the strategic level of decision making that can be classified according to their field of application and their resolution approach.

Simulation is the most cited techniques in the literature to solve this problem. As it was presented in Giso (2008), authors used simulation to compare traditional supply chain against vertical and horizontal collaborative strategies and confirmed that horizontal collaboration is the best strategy for reducing logistics costs. In Pooley and Stenger (1992), authors proposed a simulation approach to evaluate a logistic transportation consolidation strategy within a food manufacturing business to reduce costs by combining several types of logistical pooling; (1) pooling of warehouses, (2) pooling of platforms, and (3) pooling of means of transport. Wanke and Saliby (2009) developed a simulation tool to determine the impact of inventory centralization and regular transshipment inventory-pooling models, on logistic costs and indicated the best pooling scenario. Leitner et al. (2011) used simulation techniques to evaluate pooling strategy on two projects in the automobile sector in Romania and Spain and optimize cost structures. Also, Moutaoukil et al. (2013) uses several scenarios to compare the performance of a traditional logistics network against a pooling supply chain with a horizontal collaborative strategy and they used simulation technique to manage the agri-food SMEs flows. In 2017, Makaci et al. (2017) developed a generic simulation model to solve a multiple case study approach that dealt with the management of shared warehouses, a list of indicators was presented to assess the performance of logistical pooling. Recently, in health-care domain, a simulation tool was developed by Nicolas et al. (2018), the decision-maker can create, choose and compare different pooling scenarios in order to measure their impact on the local maintenance and/or pooling of product flows among hospitals.

Other studies proposed heuristic optimization approaches and exact methods to solve the collaborative supply chain design problem. Authors in Groothedde et al. (2005) used heuristics to search the best combination of hubs in a pooled logistics chain in order to minimize costs. Nataraj et al. (2019) proposed a meta-heuristic approach to solve different horizontal collaboration scenarios in the transport domain in order to increase the vehicle filling rate and decrease economic cost. In Cheong et al. (2007), a LP model was proposed to solve collaborative network design problem and decide the number, location, and operation of consolidation hubs by minimizing upstream and downstream costs of warehouses. Tuzkaya and Önüt (2009) proposed a LP model to solve a two-echelon supply chain problem for distributing automotive industry products from the suppliers to the warehouse and from the warehouse to the manufacturers to maximize profit.

For the best of our knowledge, in the operational research field, none of the existing research works has modeled or studied the impact of horizontal collaboration and pooling strategy in hospital sector and notably within territorial hospital groups, which provides us a strong motivation to study. This paper could be an extension of the work presented by Nicolas et al. (2018) where authors allow decision-makers to choose and compare the pooling scenarios of products below a THG based on a set of criteria chosen by hospital partners. However, an optimal product pooling scenario could not be generated. In this paper, we propose an optimization linear programming model that offers an optimal product pooling scenario for the decision-maker within a THG to optimize the economic performance of hospital sector among the management of several logistics costs. Therefore, a multi-supplier, multi-warehouse, and multi-product network is considered as a collaborative pooled warehousing structure. The problem is designed as a minimum-cost flow graph generalized to several products.

3 PROBLEM DESCRIPTION

In our study, the hospital logistics chain could be designed as a layered network with $|S|$ suppliers, $|W|$ warehouses, and $|P|$ products sub-family (food, cleaning materials, textiles, medicines, etc.). Knowing that every warehouse has its managing strategy that characterizes its purchasing, procurement, and storage activities and it is dedicated for serving only one establishment. The process flow consists of three steps: (1) making a procurement order from suppliers, (2) shipment of products to the warehouse of the considered hospital, and (3) the distribution of these products to the unit care. Knowing that each care unit can only be supplied by its warehouse and that each warehouse manages its procurement, warehousing, and transportation activity independently. Such a supply chain problem can generate several logistics costs such as transportation costs, inventory holding costs, and ordering costs, etc. Which explains the request to migrate for a horizontal collaborative

pooling strategy and to form a territorials hospital groups.

Therefore, our work consists in designing a pooled supply chain within various establishments of the THG. The objective is to find an optimal allocation of product flows, that are distributed from suppliers to warehouses and from warehouses to establishment, and to set up a pooling scenario that groups one or more sub-families (materials, food, etc.) of products in the suitable stores. Thus, in the present hospital logistics network, there are storage warehouses that hold the stock of one or more sub-families of products, and cross-dock stores that represent a point of material handling and distribution, where products are not stored for an extended time period. Knowing that a store can be, simultaneously, as a storage warehouse for one or more subfamilies and as a cross-dock for other subfamilies.

Our pooling scenario is carried out in two stages, (1) the placement of certain sub-families of products on one or more warehouses and (2) their distribution from these warehouses to one or more cross-docks. The proposed model allows to specify optimally for each product sub-family, its source (which supplier), its storage locations (warehouse), and its distribution to cross-docks stores. The objective is to minimize the overall economic costs defined as follows:

- Full-Time Equivalent cost (FTE): represents the workload of employees.
- Transportation cost: denotes expenses related to the distribution of products from storage warehouses to cross-docks.
- Purchasing cost: concerning product prices set by suppliers.
- Ordering cost: generated during the management of orders which vary according to their annual number (administrative and logistical monitoring, reception and handling charges, etc.).
- Holding cost: related to the inventory storage (insurance, depreciation of facilities, rental, and maintenance of premises, etc.).

Different constraints should be respected; each facility's demand for a product must be satisfied and the maximum storage capacity of warehouses should not be exceeded. In this setting, we make the following assumptions:

- Suppliers have unlimited delivery capacity.
- The supply strategy (i.e. procurement periods, unit costs, etc.) of the warehouse where the pooling of products takes place is maintained.
- The number and locations of warehouses and cross-docks are assumed to be fixed and known.
- A given product could be distributed for warehouses by one or more suppliers at different prices.
- The product price proposed by a given supplier is fixed for all warehouses.

The notation sets, parameters, and decision variables used in the model are presented below.

Decision variables

$x_{p,s,w}$: quantity of product p transported from supplier s to warehouse w.

$y_{p,w,c}$: quantity of product p transported from warehouse w to cross-dock c.

Sets

S: set of suppliers, $|S|$ =1..s;

W: set of warehouses, $|W|$ =1..w;

C: set of cross-docks, $|C|$ =1..c;

P: set of products, $|P|$ = 1..p;

Variables / expression

PC: Total purchasing cost;

OC: Total ordering cost;

TC: Total transportation cost;

HC: Total holding cost;

FC: Total Full-time equivalent cost;

$PC_{p,w,s}$: Unit purchasing cost of products p by the warehouse w from the supplier s;

$HC_{p,w}$: Possession rate of product p in a warehouse w;

$OC_{p,w}$:Unit ordering cost of product p for a warehouse w;

$FC1_{p,w}$: Full-time equivalent unit cost of product p in warehouse w;

$FC2_{p,c}$: Full-time equivalent unit cost of product p in cross-dock store c;

$TC_{p,w,c}$: Unit transportation cost of product p from warehouse w to cross-docks c;

C_w: maximum storage capacity of warehouse w;

$d_{p,c}$: demand of product p by cross-dock c;

$a_{p,w}$: Unit surface occupied by product p in the warehouse w (m^2);

t: calendar days;

$PP_{p,w}$: procurement period of product p for warehouse w ($PP_{p,w} \neq 0$);

$I_{p,w}$: Average inventory level of product p in a warehouse w:

$$I_{p,w} = \frac{x_{p,s,w}}{2 * (\frac{t}{PP_{p,w}})} \quad (1)$$

$IL_{p,w}$: Inventory value of products p in warehouse w:

$$IL_{p,w} = \frac{PC_{s,w,p}x_{p,s,w}}{2 * (\frac{t}{PP_{p,w}})} \quad (2)$$

3.1 Objective function

In the economic objective function, we introduced the different costs that affect the pooling performance. It is represented by the following formula:

$$Minimize \quad PC + HC + TC + FC + OC \quad (3)$$

$$PC = \sum_{P}\sum_{S}\sum_{W} PC_{p,w,s}x_{p,s,w} \quad (4)$$

$$HC = \sum_{P}\sum_{W} HC_{p,w}IL_{p,w} \quad (5)$$

$$TC = \sum_{P}\sum_{W}\sum_{C} TC_{p,w,c}y_{p,w,c} \quad (6)$$

$$FC = \sum_{P}\sum_{S}\sum_{W}(FC1_{p,w}x_{p,s,w} + FC2_{p,c}y_{p,w,c}) \quad (7)$$

$$OC = \sum_{P}\sum_{S}\sum_{W} x_{p,s,w}OC_{p,w}(\frac{t}{PP_{p,w}}) \quad (8)$$

The economic function aims to minimize the summation of five types of costs; the purchasing cost, inventory holding costs at the warehouse, transportation cost, FTE cost and finally total ordering cost.

3.2 Constraints

The constraints of our model are as follows:

$$\sum_{W} y_{p,w,c} \geq d_{p,c} \qquad \forall c \in C, p \in P \quad (9)$$

$$\sum_{P} 2I_{p,w}a_{p,w} \leq C_w, \qquad \forall w \in W \quad (10)$$

$$\sum_{S} x_{p,s,w} - \sum_{C} y_{p,w,c} = 0, \quad \forall w \in W, p \in P \quad (11)$$

$$x_{p,s,w} \geq 0, \qquad \forall w \in W, p \in P, s \in S \quad (12)$$

$$y_{p,w,c} \geq 0, \qquad \forall w \in W, p \in P, c \in C \quad (13)$$

Constraints 9 ensures that the demand of the unit care for each subfamily of product is satisfied. Equation 10 ensure that the total products quantity at each warehouse should not exceed its storage capacity. Constraint 11 represents the balance among supplying, inventory and deliveries at each warehouse. Constraints 13 and 12 represent the types of decision variables and guarantee the positivity of the flows.

4 EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, we present computational tests and analysis results to validate the computational efficiency and effectiveness of the model and to see the impact of the horizontal collaboration on our economic objective function. Two different configurations are used, firstly we considered the pre-pooling scenario where products are delivered directly from supplier to unit care, then we considered the polling scenario, where collaboration between functional units of the THG is authorized (i.e. products can be stored in the warehouse of another unit care before being shipped). The experiments have been complimented on Intel(R) Core(TM) Duo i3-5005U 2.00 GHz and 4 Gb RAM. They have been solved using IBM ILOG CPLEX solver.

4.1 Data generation

For lack of real data, we performed computational experiments on a set of randomly generated test instances based on realistic parameter value obtained partially from a real situation of an existing territory hospital group. We considered a set of 8 instances that vary according their size and their cost structure. According to the number of warehouses, we can form two groups of instances (small and medium). Table 1 summarizes the parameters of each instances.

Tableau 1: Instances parameters

Instance	$\|W\|$	$\|P\|$
S1		4
S2		12
S3	5	20
S4		28
M1		4
M2		12
M3	20	20
M4		28

The size of an instance is given by the number of potential warehouses ($|W|$) and the number of products ($|P|$). Continuous uniform distributions,

independent from each other, were considered in the random number generation of all variables. The number of suppliers is fixed and it is equal to two, the warehouse storage capacity and the demand of the care unit are generated randomly. The unit costs structure is determined as follows; the unit ordering cost has been supposed fixed (20€) for all warehouses and all types of products. Next, for each product $p \in P$, a purchasing unit cost is chosen randomly in the interval [1, 20]. Also, for each warehouse $m \in M$, a fixed unit holding cost is set between [20,30] for all products of this warehouse.

4.2 Results and discussion

A comparison between the pre-pooling and the pooling scenarios will be considered to evaluate the effect of collaboration (is it advantageous for hospitals?). The pre-pooling scenario (SC1) presents the direct shipment of products from the supplier to the distribution center, and the pooling scenario (SC2) is obtained by solving the model presented previously with the objective economic function. Table 2 summarized the optimal solutions of different instances for the two scenarios.

Tableau 2: Optimal total cost for pre-pooling and polling scenarios

Inst	SC1	CPU	SC2	CPU	Gain
S1	2160 10^3	2.5	1780 10^3	4.2	17.6%
S2	3200 10^3	2.8	2647 10^3	7.0	17.2%
S3	3876 10^3	112.4	3356 10^3	135.2	15.5%
S4	4652 10^3	94.0	4111 10^3	162.4	13.1%
M1	1316 10^4	0.3	1166 10^4	0.9	11.3%
M2	1744 104	0.7	1238 10^4	1.4	29.0%
M3	2226 10^4	124.0	1732 10^4	342.0	22.2%
M4	2447 10^4	114.6	2174 10^4	562.0	11.2%

For all instances, the optimal logistic cost of the pre-pooling scenario is usually lower than the pooling scenario, which can confirm that the pooling strategy within the THG is advantageous and provides a remarkable improvement at the economic level. Indeed, there is a significant reduction of the total cost that varies, depending on the instance, between 13% and 17% for small ones and between 11% and 29% for medium instances. This is reflected by an improvement in FTE cost, purchasing cost, ordering cost, and inventory holding cost. The CPU time (s) required by CPLEX for each scenario SC1 and SC2 is given in the third and fifth column, respectively. It can be seen that the CPU time increases with the number of warehouses and products, and the pooling scenario is always time-consuming than the pre-pooling configuration, e.g. the CPU time of SC1 is 80% lower than SC2 in M4.

Figure 1 and Figure 2 demonstrate economically the details of costs saving realized, they represent the average of each cost among all instances. Despite the appearance of an additional transportation cost, we note that we make gains in terms of other costs; 13% for the FTE cost since the solver will choose warehouses with lowest labor costs, and 29% for purchasing cost. In addition, a reduction in inventory holding cost and ordering cost with respectively 19% and 14%. This gain results generally from the optimal pooling of multiple products between warehouses according to better flow allocation.

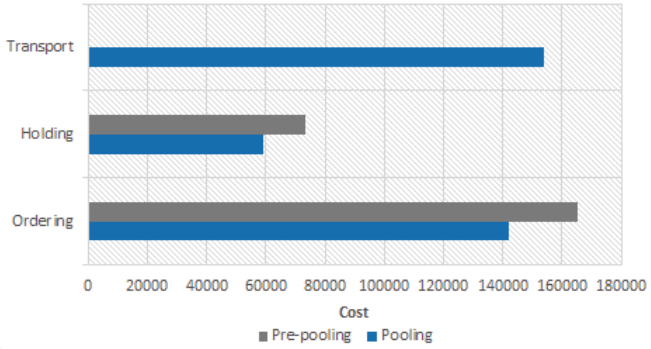


Figure 1: Transportation, holding and ordering costs variation

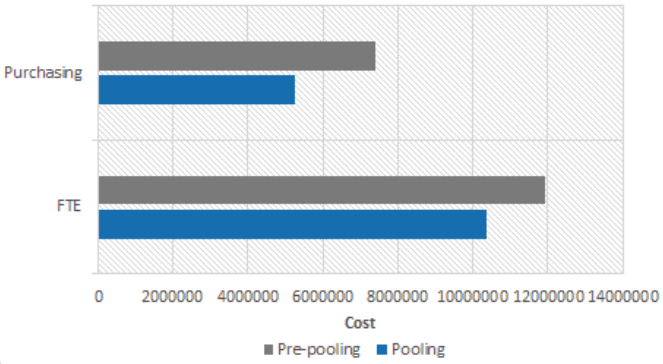


Figure 2: FTE and purchasing costs variation

Horizontal collaboration does not only have an impact on logistics costs, but also it could generate additional added value on other factors. Therefore, the resulting analysis may be projected on different important dimensions such as the warehouse filling rate. This makes it possible to quantitatively evaluate the initial situation comparing by the collaborative configuration. Furthermore, it is possible to deduct the amount of products exchanged and grouped after collaboration for each instances by presenting the percentage of pooling products (Table 3).

For each instance, a total filling rate is measured among the overall warehouses before and after collaboration. We note that for all instances, the filling rate in SC2 decreases with an improvement ranging from 1% to 2%. Therefore, we can confirm

Tableau 3: Warehouse filling rate and percentage of pooled products

Inst	% Filling rate		#SW	% Pooled product
	SC1	SC2		
S1	35%	29%	2	100%
S2	56%	52%	3	100%
S3	64%	62%	5	85%
S4	72%	67%	5	78%
M1	19%	15%	3	75%
M2	25%	21%	8	100%
M3	42%	38%	14	100%
M4	56%	52%	17	68%

that horizontal collaboration ensures better stock management and allows to save more free space and hold even more products. The fourth column represents the number of storage warehouses (#SW) kept open after collaboration. Moreover, according to pooled product percentage, it is noticed that for the majority of instances, more than 50% of products have been pooled, which confirms that collaboration is usually more advantageous.

4.3 Sensitivity analysis

In this section, we determine how target variables are affected based on changes in input parameters. It is a way to predict how changes in coefficients of the model can affect the optimal solution. Considering the importance of transportation cost generated during pooling, we motivated the analysis by increasing the unit transportation cost and assuming that warehouses are far apart to show the sensitivity of the model to this parameter. This study was carried out only on instance S1. Figure 3 shows the changes in the overall costs following the unitary increase in transportation cost.

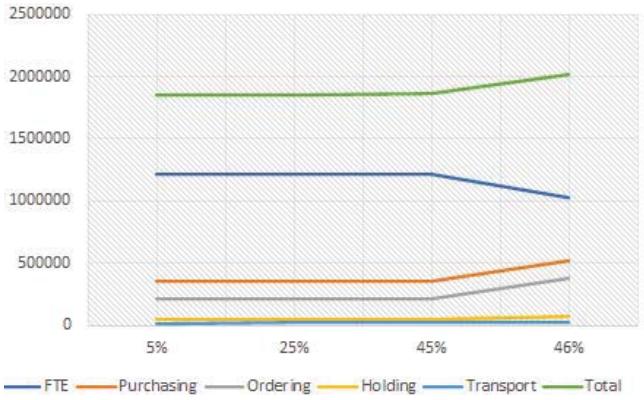


Figure 3: Sensitivity analysis when transportation cost is increasing

As it is clearly shown in Figure 3, when the unit transportation cost increases up to 45%, the total cost (objective value) gradually increases, while the other logistics costs remain constant. Above 45%, not only the transportation cost is increased but also all other logistics costs are influenced. Therefore, we can note that if the unit transportation cost is raised to a maximum of 45%, the optimal procurement and distribution plan (optimal solution) remains unchanged, but among 46% the optimal solution is no longer maintained. On the other side, we evaluate if the decrease of transportation cost affects the optimal solution and it was revealed that the coefficient can be decreased without bound by influencing only the cost of the objective value and not the optimal solution.

5 Conclusions

In this paper, we consider a collaborative supply chain within a territory hospital group in a multi-product, multi-supplier, and multi-warehouse setting. Our main objective was to demonstrate the pooling performance and improve the economic level of the supply chain. A LP optimization model was designed to organize product pooling within hospitals in order to minimize the overall logistic costs, including ordering cost, transportation cost, inventory holding cost, FTE cost, and purchasing cost. The proposed linear programming model can help managers to decide not only which product sub-family to pool, but also the storage locations of those products and the quantity transported between facilities to satisfy demand. The network presented in this study deals with capacitated facilities (warehouses/cross-dock). We test our model on small and medium instances generated. Good results are obtained; as logistics cost and warehouse filling rate.

This study can be extended in several directions. It will be possible to incorporate other different aspects of sustainable development such as environmental objectives in the context of horizontal collaboration. Also, to specify the problem for a more realistic scenario, we should deal with uncertain demand over the decision horizon.

Acknowledgements

This work is funded byçà "Agence Regionale de la Santé" of Hauts-de-France Region.

REFERENCES

Cheong, M. L., Bhatnagar, R., and Graves, S. C. (2007). Logistics network design with supplier consolidation hubs and multiple shipment options. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 3(1):51.

Giso, R. (2008). *GPA et GPA Mutualisée dans la grande distribution*. PhD thesis, Paris: Laboratoire Génie Industriel.

Groothedde, B., Ruijgrok, C., and Tavasszy, L. (2005). Towards collaborative, intermodal hub networks: A case study in the fast moving consumer goods market. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(6):567–583.

Leitner, R., Meizer, F., Prochazka, M., and Sihn, W. (2011). Structural concepts for horizontal cooperation to increase efficiency in logistics. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(3):332–337.

Makaci, M., Reaidy, P., Evrard-Samuel, K., Botta-Genoulaz, V., and Monteiro, T. (2017). Pooled warehouse management: An empirical study. *Computers & Industrial Engineering*, 112:526–536.

Moutaoukil, A., Derrouiche, R., and Neubert, G. (2013). Modeling a logistics pooling strategy for agri-food smes. In *Working Conference on Virtual Enterprises*, pages 621–630. Springer.

Mrabti, N., Hamani, N., and Delahoche, L. (2019). Vers un modèle de simulation de la mutualisation logistique 4.0. *Logistique & Management*, pages 1–15.

Nataraj, S., Ferone, D., Quintero-Araujo, C., Juan, A., and Festa, P. (2019). Consolidation centers in city logistics: A cooperative approach based on the location routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10(3):393–404.

Nicolas, J., Abdelhak, S., Derisbourg, R., Nouaouri, I., and Goncalves, G. (2018). Méthode et outil pour la rationalisation des magasins et des flux au sein des groupements hospitaliers de territoire. *9ème Conférence Francophone en gestion et ingénierie des systèmes hospitaliers*, pages 27–29.

Pillay, R. (2008). Managerial competencies of hospital managers in south africa: a survey of managers in the public and private sectors. *Human Resources for Health*, 6(1):4.

Pooley, J. and Stenger, A. J. (1992). Modeling and evaluating shipment consolidation in a logistics system. *Journal of Business Logistics*, 13(2):153.

Tuzkaya, U. R. and Önüt, S. (2009). A holonic approach based integration methodology for transportation and warehousing functions of the supply network. *Computers & Industrial Engineering*, 56(2):708–723.

Wanke, P. F. and Saliby, E. (2009). Consolidation effects: Whether and how inventories should be pooled. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(5):678–692.

ROBOTIQUE COLLABORATIVE EN MILIEU INDUSTRIEL, APPORTS DE L'ERGONOMIE DANS LA TRANSFORMATION DU TRAVAIL : ETUDE EN INDUSTRIE SIDERURGIQUE

Aurélien ADAM

CRTD - CNAM
41 rue Gay-Lussac, Paris - FRANCE
aurelien.adam.auditeur@lecnam.net

Tahar-Hakim BENCHEKROUN

CRTD – CNAM, équipe ergonomie
41 rue Gay-Lussac, Paris - FRANCE
tahar-hakim.benchekroun@lecnam.net

RESUME : *Dans les milieux industriels à risque, la robotique collaborative fait partie des solutions technologiques permettant de concilier productivité et prévention des risques liés à la santé des opérateurs sur les postes de travail. Ces systèmes homme-robot sont de plus en plus étudiés dans l'objectif d'optimiser la compétitivité des industries. Basé sur un travail réalisé dans le cadre d'un mémoire de master professionnel en ergonomie, cet article rapporte l'apport des connaissances sur l'activité des opérateurs dans le développement d'une solution de robotique collaborative en milieu sidérurgique. Plus particulièrement, il s'intéresse à la démarche d'inclusion des opérateurs dans le développement d'un système technique à base de solutions cobotiques.*

MOTS-CLES : *Robotique collaborative, Schéma décisionnel, Ergonomie*

1 INTRODUCTION

L'optimisation des postes de travail pour les entreprises est motivée par un double enjeu : dans un premier temps, il s'agit pour celle-ci de développer sa compétitivité en accroissant ses performances (moindre coût, production plus importante, meilleure qualité…) et dans un second temps, d'améliorer les conditions de travail de ses employés (réduction de la pénibilité, éviter les risques d'accidents, diminution des charges mentales…).

En ce sens, de nombreuses entreprises, s'appuyant sur de nouvelles technologies et les progrès techniques investissent dans des solutions automatisées afin de réduire les risques pour l'opérateur, notamment sur des postes à forte répétitivité et/ou avec une charge physique importante. Cependant, sur certains postes, il n'est pas possible de supprimer l'opérateur pour diverses raisons (trop de variabilité au poste, traitement cognitif des informations complexe…). C'est ainsi qu'une nouvelle voie technologique s'est ouverte : la robotique collaborative.

Comme le rapportent Bobillier-Chaumon & Dubois (2009), l'intégration d'une nouvelle technologie dans un système peut le bouleverser. C'est pourquoi il est nécessaire d'anticiper les changements que va engendrer l'arrivée de cette technologie dans le système actuel.

Il va donc être primordial de se pencher sur le facteur humain. En effet, ce dernier est souvent sous-estimé, ce qui a pour conséquence d'entraîner des difficultés et des échecs lors de conception ou d'implantation de nouvelles technologies (Monéger & al, 2015). Combien de fois l'humain a trouvé des parades pour contourner des difficultés face aux innovations. Si on garde un point de vue orienté sur le travail, il suffit de prendre en exemple les opérateurs qui chuintent les sécurités, un compromis à risque qui permet d'atteindre leurs objectifs de productivité. En fonction de son savoir-faire, de son expérience, l'humain ne réagira pas de la même manière face à l'innovation. Il s'agit donc d'établir des systèmes complexes à partir de la singularité de chaque personne.

Nous allons donc chercher à montrer ce que peut apporter l'ergonomie dans le développement d'un système de robotique collaborative, au travers d'une étude de cas en milieu sidérurgique.

2 D'UNE APPROCHE PHYSIQUE A UNE GENESE DES CONNAISSANCES

L'intervention a eu lieu dans une usine fabriquant des tuyaux en fonte ductile. Le poste impacté par le développement d'une solution de robotique collaborative est le poste de canaliste. Il s'agit du cœur même de la production du site, puisqu'il est en charge de maintenir en état le système de coulée qui permet d'acheminer la fonte en fusion, du réservoir, appelé basket, à la machine à centrifuger (Figure 1).

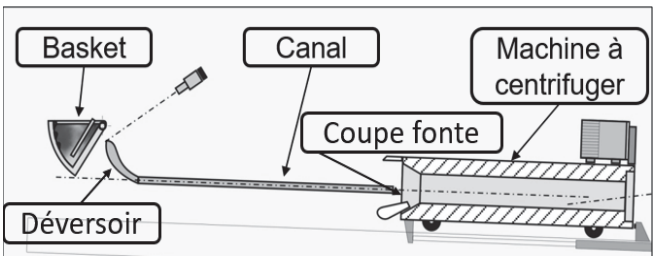


Figure 1 : Représentation schématique du système de coulée

La demande initiale formulée par l'ingénieur était la suivante : *« Réaliser l'analyse de l'activité physique du poste de canaliste dans l'objectif de créer des connaissances pour instrumenter la future solution »*. Ainsi cette demande était orientée principalement sur l'activité physique des opérateurs.

2.1 Comprendre les enjeux du projet

Dans un premier temps, plusieurs entretiens ont été réalisés auprès des différents acteurs du projet, afin de comprendre les attentes liées à ce projet. Le premier, réalisé avec l'ingénieur, précisait la nature de collaboration qui se ferait entre l'opérateur et le système, à savoir de la télé opération. De ces entretiens, deux axes principaux se sont dessinés : un premier axe orienté sur les risques importants auxquels sont exposés les opérateurs et un second sur la notion d'expertise des opérateurs. Ces deux points ne sont pas anodins dans un tel projet, puisque comme le souligne Moulières Seban (2017), *« La télé opération est principalement utilisée pour les postes où l'opérateur est dans l'incapacité d'intervenir mais pour lesquels son expertise est nécessaire »*.

2.2 Un poste à risques

Après une analyse approfondie des documents et données de la société, il s'est avéré que le poste de canaliste était le plus impacté de son secteur d'un point de vue des accidents du travail mais également des maladies professionnelles. Pour ce qui est des accidents, on dénombre principalement des brûlures, dues à la fonte en fusion, des corps étrangers dans les yeux (poussières, petits éclats de métaux) ainsi que des chocs (manutention d'outils). Pour ce qui est des maladies professionnelles, on recense essentiellement des surdités, des Troubles Musculo Squelettiques (TMS) ainsi qu'une cataracte.

Les analyses de l'environnement ont par ailleurs montré une exposition à un bruit ambiant de 97,1 dB, de fortes variations de luminosité et de températures, ainsi qu'une exposition à la silice cristalline (63% Valeur Limite d'Exposition Professionnelle).

2.3 La nécessité d'une expertise

Des premières observations sur terrain ont été réalisées lors de cette phase préliminaire de l'étude. Elles ont notamment été l'occasion de réaliser un chronogramme d'activité permettant de mettre en évidence la multitude de tâches réalisées par les opérateurs ainsi que l'absence totale d'une routine dans l'enchaînement de ces tâches. Cette variabilité dans l'enchaînement des tâches atteste d'un processus cognitif de la part des opérateurs amenant à une prise de décision pour réaliser ou non une tâche.

Ces premières observations terrains ont également permis de rendre compte d'une importante activité de surveillance des opérateurs. Des entretiens informels réalisés lors de ces premières observations ont mis en évidence cette activité réflexive des opérateurs. En effet, les opérateurs expliquent qu'ils regardent systématiquement comment s'écoule la fonte, du basket à la machine à centrifuger, car il s'agit de l'élément principal révélateur du bon entretien des parties du système de coulée.

3 INTERET DE L'ERGONOMIE POUR LE DEVELOPPEMENT DE LA ROBOTIQUE COLLABORATIVE

3.1 La télé opération

Nous parlerons bien ici de collaboration et non de coopération. Ces deux termes se distinguent selon Rogalski (1994), bien qu'il les emploie dans un contexte de travail entre humains. Ainsi, dans le cadre d'une coopération, les acteurs vont se voir attribuer des tâches respectives afin d'atteindre un but commun, tandis que dans le cadre d'une collaboration, les différents acteurs se voient assigner une tâche commune pour atteindre un but commun. Au vu des scénarii proposés précédemment, les cas de figure de coopération et de collaboration sont envisageables.

En effet, la télé opération peut prendre différentes formes selon le degré de contrôle de l'opérateur. Bitonneau (2018) propose dans sa thèse trois formes de contrôle par l'opérateur :

- Direct, sans contrôle de l'opérateur, le robot n'effectue aucune action
- Partagé, le robot peut enclencher une série d'action à partir d'une commande de l'opérateur
- Supervisé, le robot dispose d'une certaine autonomie et l'opérateur s'assure du bon déroulé des actions.

On voit ainsi apparaître différents degrés d'autonomie pour le robot, néanmoins, l'opérateur conserve l'autorité dans les différents niveaux de décision. En effet, la télé opération a été principalement développée dans le milieu nucléaire afin de sortir les opérateurs de zones de travail hostiles. La nécessité de composer avec leur savoir-faire étant toutefois indispensable, il était impossible d'automatiser la tâche.

Dans le cadre de la mise en place d'une activité télé opérée, il convient donc d'étudier un système Homme-Robot-Tâche plutôt que d'étudier chaque entité individuellement. En effet, Moulières-Seban (2017) propose un modèle de la cybernétique auto-apprenant, dans lequel le couple Homme-Robot réagit à des informations appelées « Input » pour produire un résultat appelé « Output ». Ce modèle met en évidence une boucle rétroactive qui aura un effet sur la tâche, les procédés ou encore les objectifs qui nourrissent le système.

L'étude de ce système nous amène au point suivant et la notion d'acceptation de la technologie pour la situation de travail future.

3.2 De l'acceptabilité à l'acceptation de la technologie

La transformation d'une situation de travail en y implantant une technologie n'est pas toujours évidente. On rencontre souvent une certaine réticence de la part des opérateurs quant à leur possible substitution par une technologie, dans le cas présent un robot. Malgré que celui-ci est considéré comme collaboratif et qu'il n'aura pas vocation à remplacer l'opérateur, ce dernier sera influencé par deux forme d'acceptabilité[1] : l'acceptabilité pratique et l'acceptabilité sociale. L'acceptabilité est donc un indicateur antérieur à la situation future permettant d'estimer le degré d'acceptation futur de la technologie.
L'acceptabilité pratique va alors faire référence au caractère pratique de la future situation de travail. La technologie sera-t-elle suffisamment flexible et adaptable afin qu'elle permette à l'opérateur d'atteindre ses buts de manière efficace et efficiente. Dans ce sens, Davis (1986) a développé un modèle appelé le Technology Model Acceptance, basé sur deux notions :

- L'utilité perçue (PU), qui est le degré de croyance d'une personne de l'apport d'un système pour améliorer sa performance
- La facilité d'utilisation perçue (PEOU), qui est le degré de perception que l'utilisation d'un système se fera sans effort

En complément, l'acceptabilité sociale à une approche plus socio-cognitive. Comment va réagir l'opérateur face à la technologie vis-à-vis de ses valeurs et de l'organisation au sein de laquelle il va évoluer. Humbert (2010) met en garde face au processus de résistance de certains opérateurs en réponse au changement. Il émet alors une liste de craintes récurrentes qui dépendent du contexte d'implantation de la technologie :

- **Changement de nature du travail**, un travail manuel peut se transformer en travail télé opéré entraînant une perte de plaisir de faire ;
- **Perte de statut**, un travail reconnu par son savoir-faire peut être dévalorisé par la réalisation de la tâche par un automate ;
- **Altération des relations interpersonnelles**, les deux points précédents peuvent un avoir un effets plus importants si on les retrouve dans une organisation collective du travail ;
- **Perte de pouvoir**, l'opérateur n'a plus le droit d'agir de son plein gré
- Changement de prise de décision,
- **Incertitude des informations**, la mise en place de la technologie réduit voire supprime l'accès à certaines informations, essentielles pour l'opérateur ;
- **Remise en cause des compétences**, manque de compétences pour occuper un même poste qui dispose d'une nouvelle technologie.

Plus le niveau d'acceptabilité sera élevé, plus l'acceptation de la technologie sera simplifiée. L'acceptation est un processus dynamique effectif à partir du moment où l'opérateur interagit avec la nouvelle technologie. Afin de s'assurer que celle-ci soit optimale Bobilier-Chaumon & Dubois (2009) proposent deux niveaux d'analyse :

- L'anticipation qui est l'évaluation de l'utilisateur des coûts/bénéfices liés à l'utilisation de la technologie. L'opérateur se représente ainsi le système dans lequel il évoluera avec la technologie de manière abstraite.
- L'acceptation effective qui est une forme où l'utilisateur connaît déjà la technologie. Son acceptation va donc dépendre de l'expérience passée avec cette technologie.

Ses deux niveaux d'analyse placent l'opérateur au centre de la question. La question devient alors, comme le soulèvent Brangier et al (2010), quel est le processus cognitif mis en place par l'opérateur pour accepter la nouvelle technologie ; on parle alors d'acceptation opératoire.

3.3 Perspectives pour l'intervention

Cette brève revue bibliographique a pour objectif de montrer la complexité de la transformation de travail lorsqu'il s'agit d'y insérer une nouvelle technologie. Les notions d'acceptabilité et d'acceptation montrent que la transformation est un processus long qui nécessite de placer l'opérateur en son centre. L'aspect pratique pour ce qui est de l'atteinte de l'objectif et l'aspect socio cognitif pour ce qui est de la perception de soi au sein de l'organisation sont les éléments déterminants de l'acceptation de la technologie.

Il sera donc indispensable d'inclure les opérateurs du début à la fin du projet, d'une part pour les faire adhérer au projet, et d'autre part pour assurer la pérennité du futur système de travail.

Il s'agit de ne pas tomber dans le « Men Are Better At – Machine Are Better At » (MABA-MABA) dont parlent Dekker et Woods (2002) qui tend à répartir les tâches au préalable alors qu'on ne sait pas encore comment va s'organiser l'activité future. Les futures fonctions de chacun, le robot et l'opérateur, doivent être définies à partir de l'analyse de la situation de travail actuelle et de la simulation du travail futur. La démarche ergonomique offre la possibilité de co-construire les solutions en faisant participer les opérateurs.

[1] « Valeur de la représentation mentale que se construisent les individus concernant un objet technologique. Volonté explicite de l'utilisateur de faire usage de la technologie » (Ozenne et al, 2018)

4 UN TRAVAIL INDEPENDANT AU SEIN D'UNE ORGANISATION : UNE ACTIVITE RICHE PAR L'EXPERIENCE

Pour poursuivre l'étude, nous nous sommes basés sur la méthodologie proposée par Moulières Seban et al (2016), comme présentée sur la Figure 2. Ce modèle permet notamment de compléter le modèle proposé par Barcellini et al (2013), en étant plus spécifique à l'intervention présentée. Ainsi, l'ensemble des étapes listées ici permet de produire des connaissances sur l'activité qui seront nécessaires à l'ingénieur, pour concevoir la solution future. Dans le cadre de cet article, nous nous focaliserons sur l'analyse de l'existant, aboutissant au cahier des charges fonctionnel.

En effet, à ce stade de l'étude, l'ingénieur propose 3 scénarii possibles pour imaginer la solution future. Les premières observations ouvertes et les premiers entretiens exploratoires auront pour objectif de cibler le scénario idéal parmi les trois suivants :

- Scénario 1 : Quelques tâches réalisées avec le système ;
- Scénario 2 : Toutes les tâches réalisées avec le système avec une fiabilité inférieure à 100% ;
- Scénario 3 : Toutes les tâches réalisées avec le système avec une fiabilité à 100%.

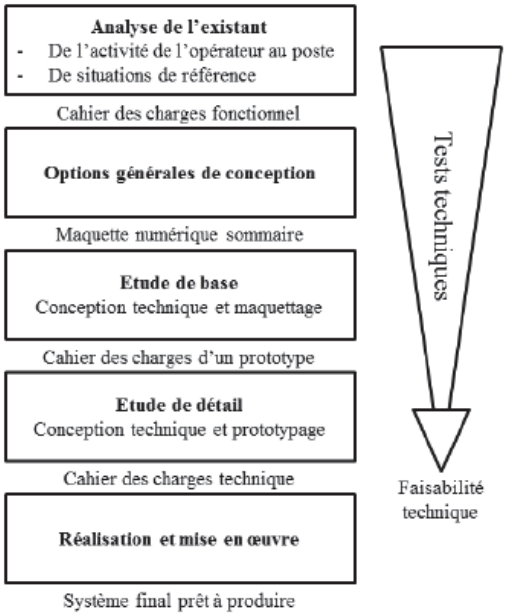


Figure 2 : Processus global de conception d'un système cobotique industriel

4.1 Analyse des tâches du canaliste

Les fiches de poste et HSE ne sont que très peu exhaustives au regard du nombre de tâches observées et reportées sur le chronogramme. Ce manque d'informations officielles sur la prescription du travail des canalistes laisse penser qu'il existe une grande part d'activité informelle et beaucoup de gestion en situation de travail de la part des opérateurs.

De plus, les canalistes opèrent par deux pour une même machine. Ils se nomment « canaliste PAM » (CP) et « canaliste BLD » (CB). Afin d'augmenter la cadence de production, une machine à centrifuger dispose de deux canaux permettant d'acheminer la fonte du basket à la machine. Ainsi quand la coulée se réalise sur le canal PAM, le second canal (BLD) retourne à quai, près du canaliste du même nom, afin que celui-ci puisse réaliser ses tâches d'entretiens. Puis par translation, les deux canaux se décalent afin que le canal ayant servi puisse à son tour être entretenu, tandis que l'autre servira à la coulée.

Ainsi, chaque canaliste s'occupe d'un canal. En revanche, les tâches réalisées sur le basket ou sur la machine à centrifuger sont partagées entre les opérateurs. Par exemple, le CB intervient seul sur la machine à centrifuger, il interviendra pour mettre de la graisse au coupe fonte et décollera la fonte agglomérée sur la paroi à l'aide d'une perche en métal. Au niveau du basket, le CB écrème le basket (Figure 4), c'est-à-dire qu'il enlève la fonte impure à la surface du basket à l'aide d'une perche, tandis que le CP fait de même au niveau du bec du basket.

Les canalistes interviennent physiquement sur le canal, une fois que ce dernier est à quai. Cependant, l'activité des canalistes est continue, puisqu'ils observent la fonte pendant la coulée. Cette prise d'information leur permet d'estimer si le canal est en bon état et qu'aucune action n'est à mener ou, d'identifier les zones du canal sur lesquelles il doit intervenir. En fonction de l'anomalie repérée, il peut être amené à :

- Utiliser une barre à mine pour enlever un résidu de fonte collé dans le canal
- Utiliser un gant pour lisser les aspérités du noir dans le canal
- Gratter le canal avec une brosse en fer pour décoller une section de noir avant d'en remettre à l'aide d'un pinceau large.

Pour extraire les éléments décollés du canal par les opérations listées précédemment, chaque canaliste dispose d'un pupitre de commande situé derrière lui, lui permettant de commander le canal en mode manuel.

4.2 Des communications nécessaires

Les canalistes travaillent en collaboration avec un machiniste (gère les paramètres de la machine) et un pontier (achemine la fonte au poste avec un pont roulant). Etant donné le bruit ambiant et les distances qui séparent les différents opérateurs, sans compter que le pontier est en hauteur dans une cabine fermée, les interactions se font principalement par gestes. Lorsque les canalistes interagissent entre eux ou avec le machiniste, ils s'interpellent par un cri avant de communiquer par geste. Pour ce qui est des communications avec le pontier, les canalistes l'interpellent par des gestes. De par l'implantation des

postes, le machiniste et le pontier ne peuvent communiquer directement. Le machiniste passe alors par l'intermédiaire du canaliste PAM pour transmettre une information au pontier comme l'illustre la Figure 3. Par exemple, lors des observations ouvertes, la machine a rencontré des difficultés à extraire un tuyau. Le machiniste a alors alerté le canaliste pour que celui-ci prévienne le pontier, afin qu'il ne remplisse pas le basket et ainsi éviter que la fonte refroidisse en attendant que le problème soit résolu.

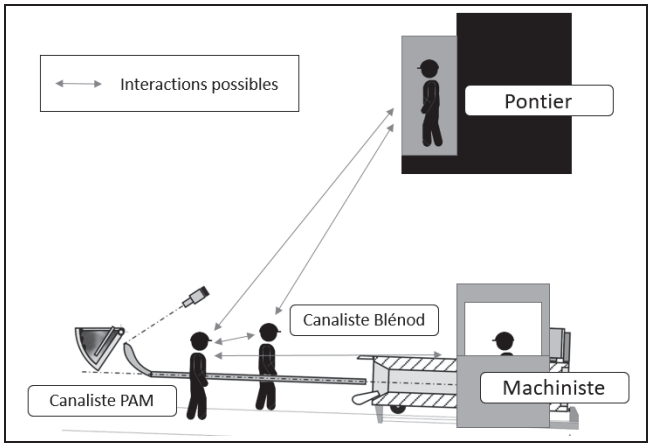


Figure 3 : Représentation des interactions entre les différents opérateurs

4.3 Résultats des entretiens exploratoires

Des entretiens ont été réalisés avec l'ensemble du personnel opérant sur le plancher de coulée (canalistes, machinistes et pontier). Ces entretiens ont notamment permis de valider le choix du scénario optimal pour la suite de l'étude. En effet, les verbatims relevés lors des entretiens ont mis en évidence la réalisation d'opérations impossibles à automatiser, voire pour lesquelles l'intervention physique de l'opérateur était indispensable.

Lors des entretiens, il a été identifié des systèmes de prise d'information-mobilisation de compétences propres aux opérateurs. Ces systèmes mettent en évidence l'expérience des opérateurs et la nécessité de les intégrer dans la conception de la future solution. Par exemple, l'une des tâches réalisées par le canaliste est de gratter le canal. Pour se faire, l'opérateur déclare : « *Je vois quand ça va coller, quand les baguettes collent dans le canal, quand la baguette ne tombe pas toute droite*. ». Pour cela, l'opérateur explique qu'il « y a une façon de gratter ». Ces verbatims, parmi tant d'autres justifient le choix du scénario numéro 1. De plus, ils suggèrent pour la suite de l'étude, d'intégrer les opérateurs afin d'identifier les informations nécessaires au déclenchement de l'action, ainsi que les spécificités techniques du futur robot pour qu'il puisse réaliser correctement les actions.

5 IDENTIFICATION DE LA TELE OPERABILITE DU TRAVAIL : VERS UNE TRANSFORMATION DE L'ACTIVITE

5.1 Entretiens de classement des tâches

A la suite de ces observations et de ces entretiens, de nouveaux entretiens ont été réalisés afin de classer les différentes tâches selon trois niveaux :

- Tâches automatisables, elles sont considérées par les opérateurs comme ne mobilisant pas de compétences particulières. L'ingénieur devrait réaliser des recherches en parallèle pour savoir comment les automatiser ;
- Tâches télé opérables, elles seraient réalisables par un robot, mais avec la réflexion de l'opérateur. Ces tâches vont faire l'objet d'entretiens en auto confrontation, pour formaliser des schémas décisionnels ;
- Tâches nécessitant l'intervention physique de l'opérateur, elles ne sont pas substituables à l'action physique des opérateurs. Pour ces tâches, il faudra identifier les modalités d'intervention de l'opérateur dans la zone.

Ces entretiens ont été réalisés avec 8 canalistes volontaires. Dans un premier temps, il leur était demandé de confirmer que la liste des tâches était exhaustive, avant de voir avec eux, s'ils estimaient que les tâches étaient automatisables, télé opérables ou nécessiteraient leur intervention physique.

Les résultats ont ensuite été croisés entre chaque entretien pour voir l'homogénéité des réponses avant d'être présentés aux opérateurs pour discussions et validation.

5.2 Formalisation de schémas décisionnels

Comme vu précédemment, les tâches considérées comme automatisables ont fait l'objet d'entretiens en auto confrontation. En effet, selon Six-Touchard & Falzon (2013) *« Les opérateurs expérimentés savent déployer une activité efficace, efficiente, pertinente mais n'ont pas conscience de leurs modes opératoires et des prises d'informations et de décisions qui les sous-tendent »* et l'entretien en auto confrontation est un outil permettant la verbalisation de l'activité cognitive des opérateurs.

5.2.1 Méthodologie

Pour ce faire, la société TEA est intervenue avec la technologie Tobii® qui est un système de eye tracking. Ainsi, nous avons pu enregistrer des vidéos montrant ce sur quoi se porte le regard d'un opérateur en temps réel. Ces enregistrements ont duré deux heures. Cette durée a été déterminée car elle permet de prendre en compte l'ensemble des tâches, notamment une réalisée par les opérateurs seulement une fois toutes les deux heures.

Une fois les données vidéos récupérées, des séquences ont été sélectionnées, faisant références aux Situations d'Action Caractéristiques (SAC) qui ont pu être déterminées, à savoir les différentes tâches. Etant donné les contraintes de temps liées au contrat de stage, seulement quelques tâches ont pu être soumises aux entretiens, mais ont néanmoins permis d'identifier des spécifications pour la conception.

5.2.2 Résultats et repères pour la conception

Lors des entretiens, il était demandé à l'opérateur de verbaliser l'action qu'il visionnait sur l'écran. A partir de ces verbalisations il était possible de mettre en pause la vidéo afin de questionner de manière plus approfondie l'opérateur sur ses réflexions l'amenant à agir. Le schéma suivant (Figure 4) est le résultat de l'observation d'une séquence traitant d'une remise de noir dans le canal.

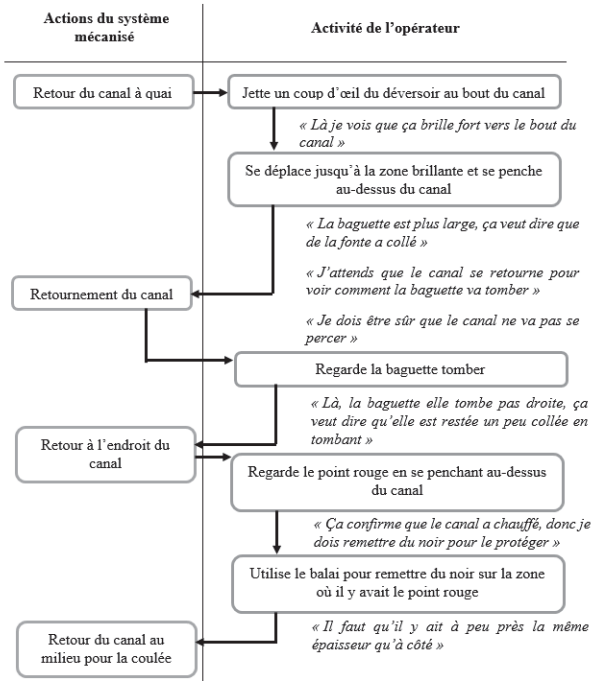


Figure 4 : Schéma décisionnel relatif à la remise de noir dans le canal

Garrec et al (2010) définissent la télé opération comme un *« ensemble de techniques qui permettent à l'homme de transposer ses capacités d'action (observation, manipulation) en temps réel à distance grâce à des retours sensoriels »*. Ce schéma décisionnel sert donc ensuite de base à l'ingénieur pour identifier des fonctions qui seront nécessaires lors de la conception de la solution collaborative. En effet, en fonction des actions réalisées par l'opérateur en phase de travail, associées aux différentes explications verbalisées et formalisées, il sera possible pour l'ingénieur de se construire des repères essentiels pour la conception. Par exemple, le cas étudié en Figure 6 suppose que l'opérateur puisse avoir depuis son poste de contrôle, une visibilité globale sur le canal, mais également qu'il puisse définir une zone précise sur laquelle il voudrait avoir une vue. De plus, il a besoin de pouvoir observer la forme que prend la baguette lorsqu'elle tombe ainsi qu'il est la possibilité d'appliquer du noir sur la zone de son choix et en quantité voulue. Ces quatre points sont des éléments à intégrer au cahier des charges fonctionnelles du futur système.

DISCUSSIONS

A partir d'une demande initiale orientée sur l'activité physique du poste, l'analyse des enjeux du projet a permis de réorienter l'intervention ergonomique. En effet, l'analyse du projet est la première phase de l'intervention ergonomique, tant elle permet de comprendre le projet, mais également de correctement l'orienter.

Ces connaissances empiriques sur l'activité de l'opérateur, générées par ces entretiens (Theureau, 2002), ont permis de définir des SAC. Ces derniers vont alors permettre à l'ingénieur, avec la participation des opérateurs d'anticiper les fonctionnalités de la future solution. Le rôle de l'ingénieur va alors être d'apporter ses connaissances techniques et technologiques qui vont pouvoir suppléer l'activité actuelle des opérateurs. Dans le cadre du projet de cobotique actuel, ces améliorations technologiques doivent être proposées par le concepteur en réponse aux différents schémas de raisonnement des opérateurs afin d'intégrer les futurs scénarii de simulation.

En tant qu'ergonome, l'un de nos rôles aura été d'accompagner au changement des représentations que peuvent avoir les opérateurs de leur future situation de travail. La démarche appliquée dans le cadre de ce projet, en expliquant les enjeux pour les canalistes (santé actuelle et travail futur) dès le début du projet, a permis de faire évoluer la représentation initiale qu'ils pouvaient avoir de l'installation d'un système robotisé au poste. Par un positionnement centré sur le travail et l'activité réelle mobilisée en situation, il a été possible de faire prendre du recul aux opérateurs sur leur poste. Il s'agit d'un procédé de production ancien, qui n'a peu ou pas connu d'évolution. La représentation d'une solution aussi innovante que celle-ci a pu paraître impensable pour les anciens. La démarche ergonomique participe aux processus de transition vers l'acceptation du changement.

Pour aller plus loin, la simulation de l'activité future va permettre de développer un langage commun aux deux parties pour faciliter l'acceptation du changement pour les opérateurs. De plus, cette démarche participative permet aux futurs utilisateurs de se familiariser avec la nouvelle technologie (Ozenne et al, 2018). La participation permet un apprentissage partagé (Kleinpeter, 2015) entre la technologie qui sera alors adaptée à l'activité de l'opérateur et l'opérateur lui-même qui pourra évoluer dans une situation, qui au lieu d'être subi, devient partagée.

La mise en place d'une nouvelle solution, au sein d'une nouvelle organisation permet de supprimer des déterminants qui étaient sources de contraintes pour l'activité de l'opérateur, mais peut aussi apporter d'autres contraintes qu'il va falloir anticiper (Moullières-Seban, 2017). En effet, du point de vue organisationnel, la maintenance, la révision, le réglage des bras télé opérés devra être prévue et fera partie de l'activité du plancher de coulée. Comment faire en cas de panne d'un des systèmes ? La zone sera-t-elle toujours adaptée pour que l'opérateur puisse travailler sans la machine ? Ces questions devront être anticipées afin que l'organisation ne soit pas source de contraintes.

REFERENCES

Barcellini, F., Van Belleghem, L. et Daniellou, F. (2013) Les projets de conception comme opportunité de développement des activités. In Falzon, P. (coord.) Ergonomie constructive. Paris PUF.

Bitonneau, D. (2018). *Conception de systèmes cobotiques industriels : approche robotique avec prise en compte des facteurs humains : application à l'industrie manufacturière au sein de Safran et Ariane Group* (Doctoral dissertation, Bordeaux).

Brangier, E., Hammes-Adelé, S., & Bastien, J. M. (2010). Analyse critique des approches de l'acceptation des technologies : de l'utilisabilité à la symbiose humain-technologie-organisation. *Revue européenne de psychologie appliquée/European Review of Applied Psychology*, *60*(2), 129-146.

Bobillier-Chaumon, M. E., & Dubois, M. (2009). L'adoption des technologies en situation professionnelle : quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ?. *Le travail humain*, *72*(4), 355-382.

Davis, F. (1986), A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: theory and results, *Doctoral dissertation*, *MIT Sloan School of Management, Cambridge, MA*

Dekker, S. W., & Woods, D. D. (2002). MABA-MABA or abracadabra? Progress on human–automation coordination. *Cognition, Technology & Work*, *4*(4), 240-244.

Garrec, P., Measson, Y., Gelin, R., Friconneau, J. P., Desbats, P., & Riwan, A. (2010). Téléopération : les applications en zone contrôlée. *Techniques de l'ingénieur*, S7812 1-S7812 15.

Humbert, P. (2010). Pilotage de la conception d'outils numériques. *Les cahiers du numérique*, *6*(4), 49-75.

Kleinpeter, É. (2015). Le Cobot, la coopération entre l'utilisateur et la machine. *Multitudes*, (1), 70-75.

Monéger, F., Coutarel, F., Motak, L., Chambres, P., Izaute, M., & Dhome, M. (2015). Quelle pertinence des modèles de l'expérience utilisateur pour la conception d'une navette autonome ? In *Articulation performance et santé dans l'évolution des systèmes de production*, 125-133.

Moulières-Seban, T., Bitonneau, D., Thibault, J. F., Salotti, J., & Claverie, B. (2016). La Cobotique : un domaine pluridisciplinaire émergent utile à l'ergonome. *Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française*.

Moulières-Seban, T. (2017). *Conception de systèmes cobotiques industriels. Approche cognitique Application à la production pyrotechnique au sein d'Ariane Group* (Doctoral dissertation).

Ozenne, R., Terriot, K., Spirito, V., Laeuffer, C., Lhotellier, L., & Bernaud, J. L. (2018). Intention d'usage des nouvelles technologies dans le conseil en orientation : perceptions des professionnels et des bénéficiaires. *Le travail humain*, *81*(2), 115-141.

Rogalski, J. (1994). Formation aux activités collectives. *Le travail humain*, 367-386.

Six-Touchard, B., & Falzon, P. (2013). L'auto-analyse du travail : une ressource pour le développement des compétences. *Ergonomie constructive*, 223-23.

Theureau, J. (2002). L'entretien d'autoconfrontation comme composante d'un programme de recherche empirique et technologique. *D. Lehénaff & C. Mathieu, Expertise et sport de haut niveau, Actes des II èmes Journées Internationales des Sciences du Sport*.

On the continuity of the swarm robot design using MBSE method and simulation

K. ALOUI, M. HAMMADI, T. SORIANO

QUARTZ Lab EA7393 - SUPMECA - 3 rue Fernand Hainaut 93400 Saint-Ouen, France
alouika95@gmail.com, moncef.hammadi@supmeca.fr, thierry.soriano@univ-tln.fr

A. GUIZANI, M. HADDAR

University of Sfax
LA2MP, Ecole Natioanle d'Ingénieurs de Sfax
km 4 route de la Soukra, Sfax 3038, Tunisia
amir.guizani@live.fr, mohamed.haddar@enis.rnu.tn

ABSTRACT: *Swarm robotics is an approach to collective robotics inspired by the self-organized behaviour of social animals. This approach aims to design robust, scalable and flexible collective behaviours for the coordination of a large number of robots using simple rules and local interactions. However, this design approach faces challenges, which are not present in other multi-robot systems: The strong decentralization, the continuity of methods, finding the simple behaviours, the local communication and action, the high number of individuals and the traceability are characteristics, which make a multi-robot system "too complex to be managed effectively".*
In this paper, we present a design approach based on the Property Driven Design method for the design of swarm robots. The specification and modeling phases are performed using SysML language. We used the SysML state-machines to describe the robot behaviours. The behaviour models of the robots described with SysML are then implemented in a multi-agent tool for the simulation phase. We applied our approach to a case study of a simple robot aggregation application. Simulation results show that our approach is able to manage easily a large number of robots while ensuring the design continuity process in terms of design traceability.

KEYWORDS: *Swarm robotics, Design methods, Property Driven Design, MBSE, Simulation.*

1 INTRODUCTION

Swarm robotics have been defined as "a novel approach to the coordination of large numbers of robots". It is an approach to collective robotics, which is inspired by the self-organized behaviour of social animals. Birds, ants, fish, and bees are some examples of the simple individuals who come together in groups to complete given tasks (Sahin, 2005).

The swarm robotics research studies how to use systems made up of multiple autonomous agents (robots) to accomplish collective tasks where tasks cannot be accomplished by an individual robot alone. This approach is inspired by the system of social insects which are characterized by: robustness, flexibility and scalability. Robustness is defined as the ability to adapt to the loss of individuals. In social animals, robustness is represented by redundancy and the absence of a leader. Scalability is defined as the ability to work with different group sizes. Adding or removing individuals does not change the performance of a swarm. In social animals, scalability is promoted by local sensing and communication. Flexibility is defined as the ability to adapt to a wide range of different environments and tasks. In social animals, flexibility is promoted by redundancy, simplicity of the behaviours and mechanisms such as task allocation (Camazine et al, 2001).

Swarm robots are capable of performing tasks impossible to accomplish with other classes of robots. For example, they are able to (i) move over terrain so rough that individual robots are unable to cross, (ii) overcome obstacles larger than individual robots, or (iii) carry objects too heavy to be transported by a single robot (Fukada T et al, 1998).
All of these characteristics allow them to disperse and perform surveillance tasks, detect dangerous events, such as a chemical leak, and focus on the problem and even act to prevent the consequences (Trianni V et al, 2007).

Unfortunately, in swarm robotics, there are still no formal and precise approaches to designing behaviours at the individual level that produce the desired collective behaviour. The intuition of the human designer is still the main ingredient in the development of robotic swarm systems. Many researchers have worked on the continuity of design approaches, emphasizing the relationship between the different phases of the approach (Brambilla et al, 2004). Others chose the swarm size as a problem to solve in the design of swarm robots. They proposed that the approach should adapt to the swarm size (Dudek et al, 1993). Nevertheless, until today there is no complete methodology for the design of these types of robots.

In this paper, we present a design approach based on the Property Driven Design method for the design of swarm robots. The specification and modeling phases are performed using SysML language. We used the SysML state-machines to describe the robot behaviours. The

behaviour models of the robots described with SysML are then implemented in a multi-agent tool for the simulation phase. We applied our approach to a case study of a simple robot aggregation application.

The paper is organized as follows: in the next section, we present the related works. Our design method of swarm robots will be detailed in the section three. A case-study of a simple robot aggregation application will be considered in section four to illustrate the advantage of our approach. Finally, the paper is concluded in section five.

2 RELATED WORKS

For a long time, designers have used the 'code-and-fix' approach to develop swarm robots: It is an iterative bottom-up process, the developer tests and improves the individual behaviour of the robots until the desired collective behaviour is obtained. This approach is not structured and it depends on the developer's expertise and ingenuity. However, the design of swarming robots faces challenges that are not present in other multi-robot systems. Indeed, the characteristics of robot swarms, such as a high number of individuals, simple behaviours, strong decentralization, local communication and action, are characteristics that complicate the multi-robot system (Wooldridge and Jennings, 1998). This has prompted many researchers to propose other design approaches.

(Spears et al, 2004) used the concept of artificial force to define a new distributed framework (called artificial physics) for the control of a large number of robots. This method is very similar to the potential field method used in single robot systems, but it performs all calculations at run time. No global map is generated. The calculations are also performed locally on each robot. It is assumed that other objects in the environment apply virtual forces to the selected robot. The robot calculates the average force calculated by its observations and heads towards the direction of the average force. The force exerted on a robot from an external object depends on two things: the bearing and the distance from the external object. These two parameters can be calculated from local observations. This framework is suitable for swarm robotic studies.

(Hamann and Wörn, 2008) have proposed a method inspired by statistical physics. The authors describe the individual behaviours of robots using Langevin equations and, by analytical means. They derive a Fokker-Planck equation describing collective behavior. Another similar approach has also been proposed by (Berman et al, 2011), which derived the individual behaviours of a swarm performing task distribution using a set of partial differential advection-diffusion-reaction equations. Both methods are based on the developer's ability to model robot interactions and advanced mathematical techniques, and these methods are based on ordinary or partial differential equations, which provide reliable results if the size of the swarm is infinite. In swarm robotics, this is very often not the case, because robot swarms are generally composed of around a hundred robots and often a few dozen robots (Brambilla et al, 2013).

(Kazadi et al, 2009) have proposed a design approach based on Hamiltonian vector fields called the Hamiltonian method. From a mathematical description of collective behaviour, the method can be used to derive microscopic rules which minimize or maximize a selected numerical value (for example, the virtual potential energy of a particular state of the swarm). However, this method only deals with spatial organization behaviours such as pattern formation.

(Berman et al, 2009) have developed a top-down approach for the design of task allocation behaviour. The authors present the system as a Markov chain in which the states represent tasks and the edges represent the possibility of a robot to move from one task to another. Using a stochastic optimization method, it is possible to derive the probabilities that govern how robots change tasks in order to minimize the time required to converge on the desired allocation. This approach is specific only for the distribution of tasks and has not been extended to other collective behaviours.

Recently, (Konur et al, 2012) have proposed a different approach. The authors used model verification on a macroscopic model of a swarm of foraging robots. They specified the desired properties of the system using the Probabilistic Computation Tree Logic (PCTL), a temporal logic which includes probabilistic aspects. This approach is capable of going beyond the limits of linear temporal logic. In addition, the use of a macroscopic model, instead of a microscopic model, allows this approach to deal with systems made up of dozens of robots.

(Brambilla et al, 2012) have proposed a new top-down design method for swarm robots based on normative modeling and model verification called "Property Driven Design". The method consists of four phases: In the first phase, the developer specifies the requirements of the swarm of robots by specifying the desired properties. For the second phase, the developer creates a normative model of the swarm and uses model verification to verify that this model satisfies the desired properties. In the third phase, the developer implements a simulated version of the desired robot swarm and validates the prescriptive model developed in the previous steps. Finally, the developer implements the desired swarm of robots.

In this paper, we propose to develop a design approach of swarm robots based on the Property Driven Design method. The specification and modeling phases are performed using SysML language. The behaviour models of the robots described with SysML are then

implemented in a multi-agent tool for the simulation phase.

In 2006, OMG published the initial standard for SysML (Systems Modeling Language), an extension of UML designed to support systems engineering in general, but specifically system modeling. SysML is a graphical language for building models of large-scale, complex, and multi-disciplinary systems. It re-uses a subset of UML, and adds some new diagrams specifically designed to support systems engineering (OMG 2006).

In the following section, we detail our design approach of swarm robots. This approach is based on the different phases of the property Driven Design method using SysML diagrams.

3 DESIGN APPROACH OF SWARM ROBOTS

The principle of our design approach is that a robotic swarm system can be described through a series of properties. The specification of these requirements is carried out through SysML diagrams. These properties are the characteristics of the system that the developer wishes to realize.

In the first phase, the swarm developer uses the requirements diagram to specify the requirements representing the customer/user needs of the swarm. The SysML use-case diagram and sequence diagram are then used to describe the missions of the robots.

For the second phase, the developer creates the model describing the structure of the swarm using the Block Definition Diagram (BDD). The swarm architecture showing the composition, the links and the interactions between the robots is described with the Internal Block Diagram (IBD). The swarm behaviour is modelled using the SysML state-machines, for both the individual and swarm levels. At the end of this phase, a second requirement diagram describing the technical specification of the swarm is generated. Model verification step allows the swarm developer to verify that the model satisfies the desired properties by tracing the technical specification with customer needs and the functional/behavioural attributes generated.

In the third phase, the robot behaviour models described with SysML state-machines in the second phase are then implemented in a multi-agent tool for the simulation phase.

Finally, in the fourth phase, the developer implements the simulated version of the swarm model developed in real robots.

In figure 1, we present the steps of our approach with the different SysML diagrams used in the different phases.

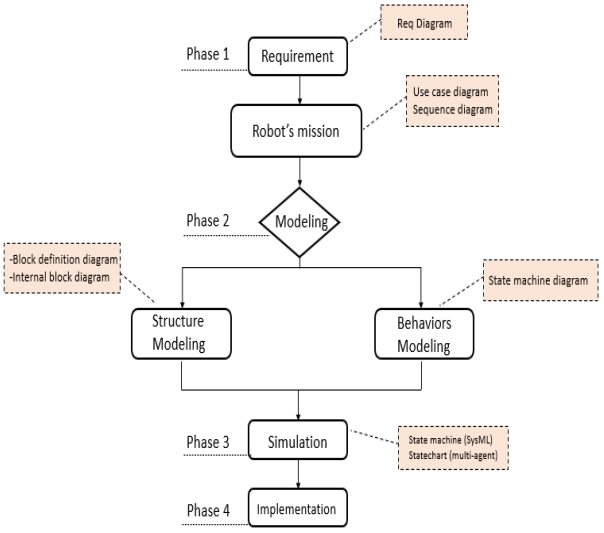


Figure 1 : Design approach process

The detail of these phases is as follows:

Phase 1: Specification of properties
The first phase consists informally specifying the system requirements and identifying the desired properties using a requirements diagram, which graphically describes a capacity or a constraint, which must be satisfied by a system. The clearer and more complete these properties, the more the system developed will comply with the requirements. The first phase of requirements analysis aims to build all the requirements of stakeholders (users, customers, etc.). It is interesting to note that the analysis phase identifies the system boundary and characterizes the interfaces with other systems. This step consists in producing the specification of requirements, mainly as requirement diagrams, allowing the traceability between the design levels, but also in in textual format. During this phase, the developer describes the main mission of the system with its various secondary tasks using the use-case diagrams and sequence diagrams to present and detail the different possible scenarios.

Phase 2: Creation of the model
In this phase, there are two steps: the first step is architectural modeling using structural diagrams (block definition diagrams and internal block diagrams) to describe the architecture of the system. The second step is behaviour modeling using state-machine diagrams.
In our approach, we choose the probabilistic method to describe the transitions between states and the actions that the system or its parts perform in response to an event. This allows the developer creating a normative model of the robot swarm that describes how robots change state over time. Each state is a simplified abstract description of the actions of a robot. The normative model should be detailed enough to capture the behaviour of the robots and their interactions, but should not be too detailed to avoid unnecessary complications. The desired properties indicated in the first phase are checked using model checking techniques to verify that

all the requirements are related to the structure and behaviour elements.
Initially, it is possible that the normative model does not satisfy all the desired properties. Thus, through an iterative process, the developer improves the model until the properties are satisfied. The result of this process is a normative model of the collective behaviour of the swarm robots that satisfies the declared properties.

Phase 3: Simulation of the model
The emergent swarm behaviour requires the simulation to check if the model developed in the second phase achieves the global need of the swarm robots. The simulation also is used to identify some optimal value of properties such as the number of robots to be used in a swarm mission. In our approach, we used the multi-agent simulation technic to capture and verify the emergent swarm behaviour.

In this phase, the swarm developer uses the model created in the second phase to guide the process of simulation model implementation.
Generally, the transition from a descriptive macroscopic model to a simulation microscopic implementation is difficult. It depends on the developer's expertise and ingenuity. In our approach, this transition has been eased because we are talking about a transition from the SysML state-machine diagrams to Statechart models to be implemented in a multi-agent simulation tool.

Even if we represented a linear process for our approach in figure 1, the practice shows that the process is iterative. Indeed, the simulation implementation can allow the swarm developer to identify some modeling faults that requires a return to the previous step. Simulation is also used to validate the swarm model by checking if the required properties are coherent with the simulation results. Therefore, the model in the phase two can be improved with values obtained by simulation, or in some cases the model is modified according to the simulation results found.

Phase 4: Real Implementation
In the last phase, the developer deploys the system on real robots. As for the transition between the previous phases, the developer can modify the simulated model or the descriptive model if certain assumptions are not verified to keep all the levels consistent.

In the next section, we will apply our approach to a case study of a simple robot aggregation application in order to illustrate that our approach is able to easily manage a large number of robots while ensuring the design continuity process in terms of design traceability.

4 CASE STUDY: AGGREGATION PROBLEM

The aggregation problem is studied either as an independent problem or as a part of more specialized tasks involving the grouping of a certain number of agents. An example of aggregation of autonomous robots is illustrated in Figure 2.

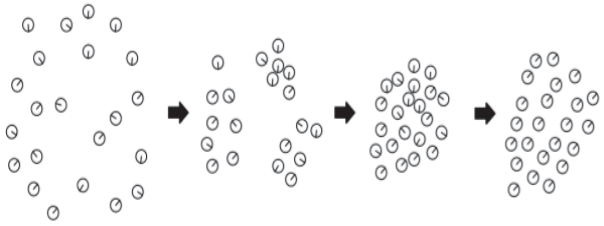


Figure 2 : An example of aggregation of autonomous agents

Among the most effective approaches for aggregating a swarm of robots are the virtual force method, the evolutionary method and the probabilistic method which we use in our approach to build the simulation model.

In this aggregation case study, we consider a white area called C with two black spots of the same size called area A and area B as illustrated in Figure 3. Each of the black spots is large enough to accommodate all the robots. We consider two sizes of swarms: 10 and 20. We use two different areas for the two different groups, of 4.91 m^2 and 19.63 m^2 respectively.

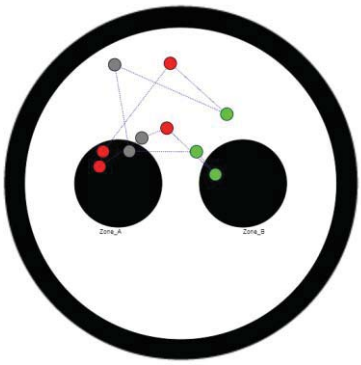


Figure 3: A screenshot of the simulated version of a swarm of robots with 10 robots

In what follows, we apply the 4-phase process of our approach

4.1 Phase one: Properties specification

The two main properties that the swarm robot must satisfy are:

- The robots must aggregate as quickly as possible in zone A or zone B. We have set a delay of 1000 seconds for the mission duration.
- The aggregate must remain stable for a specific period of time. For this, we have set a duration of 10 seconds.

Using the different SysML diagrams, we can build our model. We need to design a swarm robotic system that meets the properties specified in the first phase. The robots must regroup in zone A or B of the environment and remain stable for a period *t*. The requirements diagram illustrated in figure 4 shows two requirements

necessary to build the system. These requirements represent the customer need.

• **Choice of zone:** contains the power supply and the programming of the robots to detect the different zones and avoid obstacles. The user should check the battery level of each robot before using. In addition, the developer must program the robots to be able to avoid obstacles and choose the available area.

• **Stability in the area:** after its formation, the swarm must remain stable.

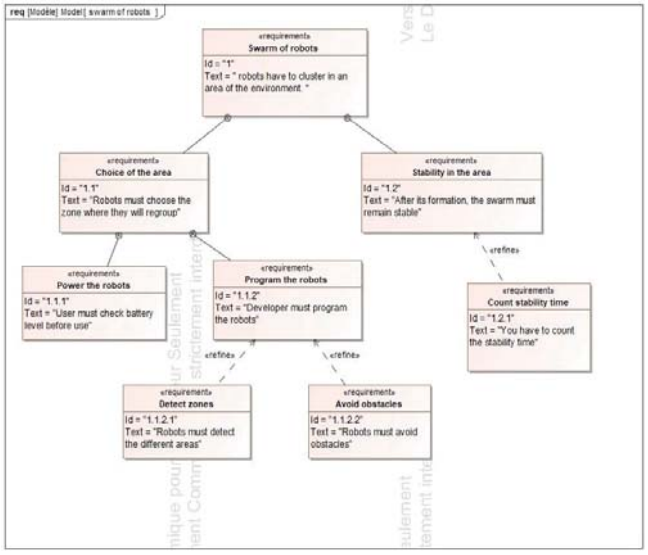


Figure 4: Requirements diagram (customer need)

Once the requirements are specified, we propose the possible use-cases that show the functional interactions of the actors and the study system. The developer describes the main mission of the system with its different secondary tasks using the sequence diagrams and use-case diagrams to present the different possible scenarios.

The use-case diagram illustrated in Figure 5 gives an overview of the functional behaviour of the swarm robot system. This mission includes 3 necessary tasks: robot programming, robot power supply and swarm self-formation.

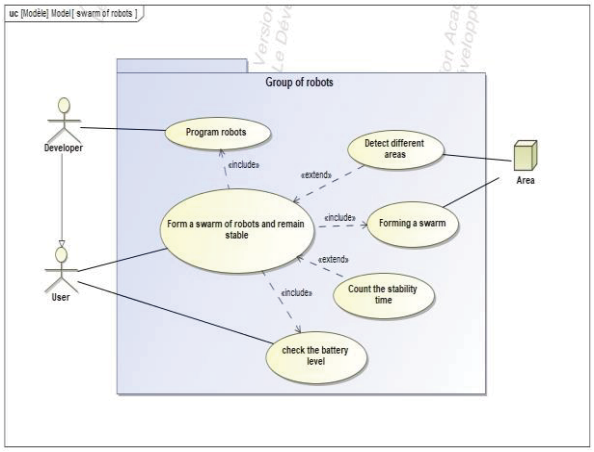


Figure 5: Use case diagram

Figure 6 shows that the developer must program the robot: This program allows the robot to distinguish between different areas of the environment and decide where to stay. Before starting operation, the user must check the robot battery level. This operation must be applied to each robot. Once the robot group is ready, two scenarios are possible:

• If the batteries are charged: the user begins to use robots to form the aggregate.

• If the batteries are low: the user must charge the batteries before starting to use them.

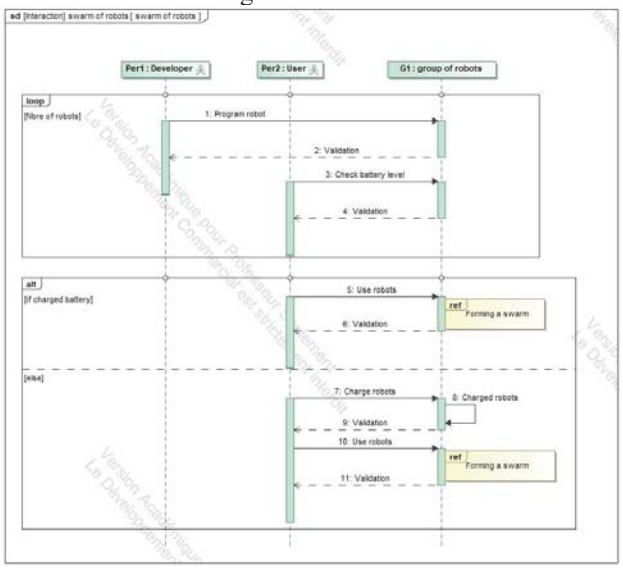


Figure 6 : Generalized sequence diagram

We use a referential block called "Forming a Swarm" that allows the swarm to perform the main function. In Figure 7 we present an instance of 5 robots to explain the "Forming a Swarm" block.

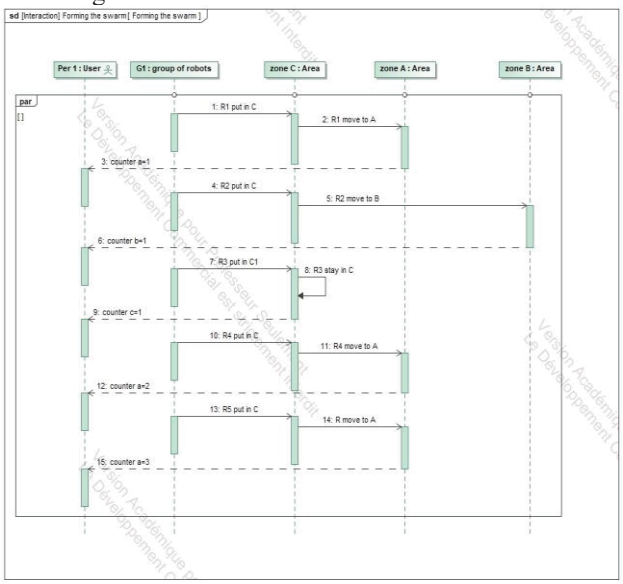


Figure 7 : Sequence diagram: an instance of 5 robots

In this example we use 5 robots: We assume that 3 robots (R1, R4 and R5) have chosen zone A, one robot (R2) has chosen zone B and the last robot (R3) has decided to stay in zone C. We define a counter that returns the number of robots detected in each zone to return this information to the user.

After the functional analysis and the mission definition, the second requirements diagram illustrated in figure 8, is used to specify the technical requirements of our system:

- **Swarm formation:** autonomy, speed and precision.
- **The swarm shape:** the general swarm shape, the geometric parameters.
- **Swarm stability:** formation time, stability time.

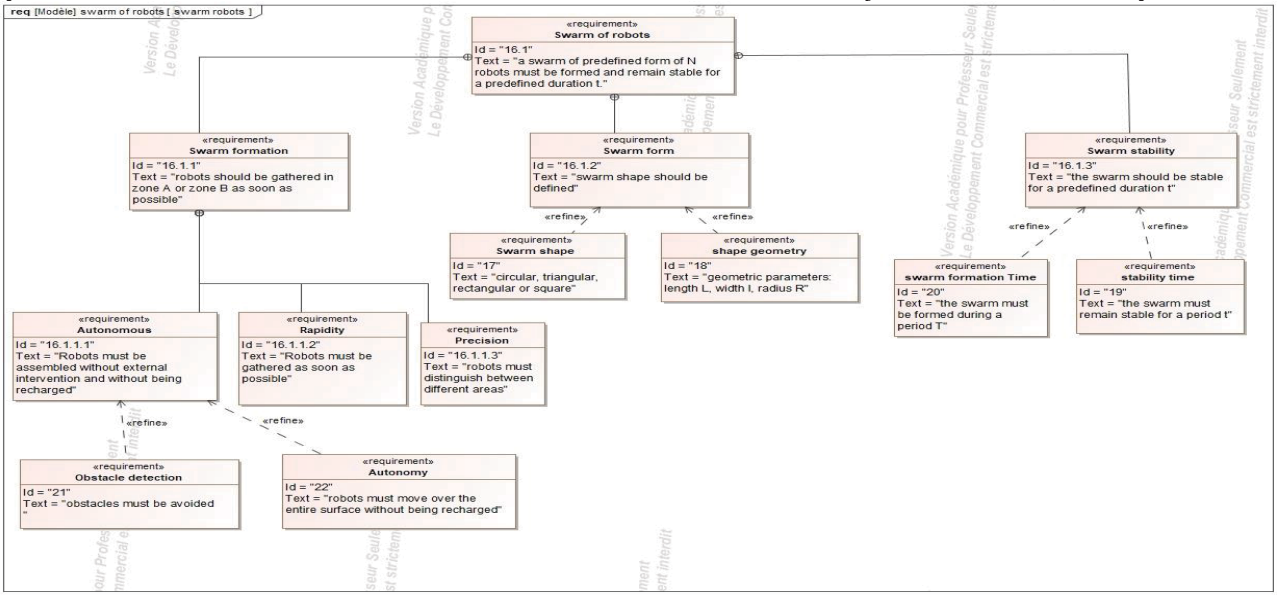


Figure 8: Requirements diagram of technical specifications

As indicated in figure 8, the formation of a swarm of robots must be autonomous without any external intervention. Indeed, the developer must design a program that allows robots to detect obstacles. In addition, the robots must move over the entire surface without being recharged each time. Each robot in the group randomly moves into the search space from its initial position. The goal of this behaviour is searching for a shelter site while avoiding static and dynamic obstacles (other robots), while the environment of the robot is completely unknown.
Obstacle avoidance is a basic behaviour found in almost all mobile robots. It is essential to allow the robot to operate in a dynamic environment. It makes it possible to avoid obstacles that appear in the robot's field of vision. For this, the robot must determine another path (via the path selection behavior). Obstacle avoidance behaviour is determined by the robot agent according to the environment in which it operates and according to its position in relation to the obstacles encountered. The method we are going to use is effective as long as we have a correct perception of the environment.

Before starting the formation, we must specify the swarm shape: circular, rectangular, each time specifying the necessary geometric parameters (length, width, radius, …)

First, we need to specify the execution time T. Once the swarm is formed, the robots must be stable for a specific period of time t.
Before going to the next step, we need to check if the technical requirements are going with the requirements describing stakeholder's needs. This verification is only the first step in a two-step process (verification, then validation) which is essential to lead to the acceptance of the system by the customer: This will be done through tests (called acceptance tests) based on the requirements identified with the customer.

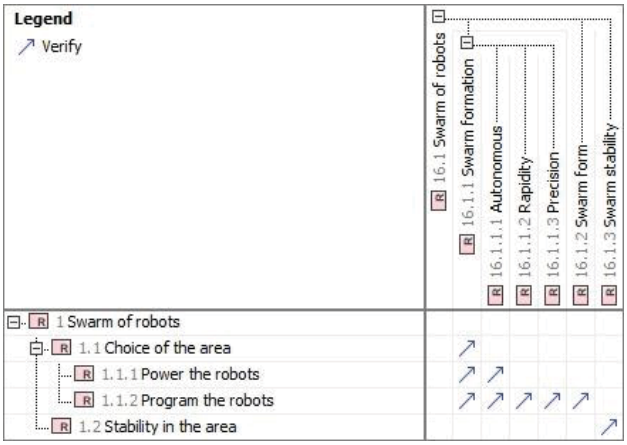


Table 1: Requirements check table

Table 1 illustrates the checking if all requirements specifying the customer needs are traced to the technical requirements of the swarm (and vice-versa).
We note in this case that all the technical requirements described in figure 8 are well linked to customer requirements described in figure 4.

4.2 Phase two: Swarm modeling

Figure 9 describes the robot development process: First, a group of autonomous robots is programmed to accomplish the mission (avoid obstacles, choose the area where will stay and communicate with other agents).

Then, the developer will check the battery levels of each robot: if the batteries are charged, we start using the robots. Else, we charge the batteries.

The design process consists of the following operations: Programming the robots, checking the batteries and recharging of the robots.

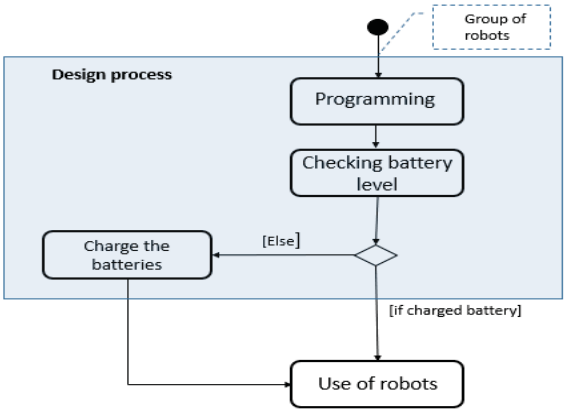


Figure 9: Robot development process

Figure 10 shows the action process that was a collection of predefined behaviours, such as displacement, aggregation, obstacle avoidance. These behaviours are necessary for moving a robot. While respecting an order of priority: in the case where the robot agent is confronted between two cases: reaching the goal (aggregate area) and avoiding an obstacle, in this case the robot must first avoid obstacles, then continue moving.

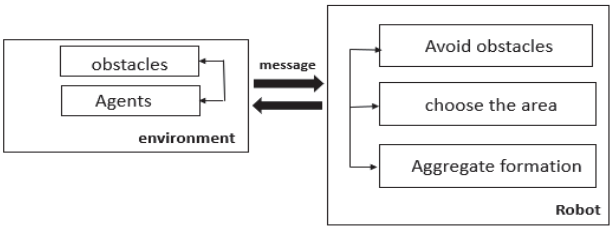


Figure 10: Action process

To understand the process, we apply in figure 11 an instance of 5 robots: 5 Robots (R1, R2, R3, R4, R5) are put in zone C, three robots have chosen zone A, one robot has chosen zone B and the latter decided to stay in zone C.

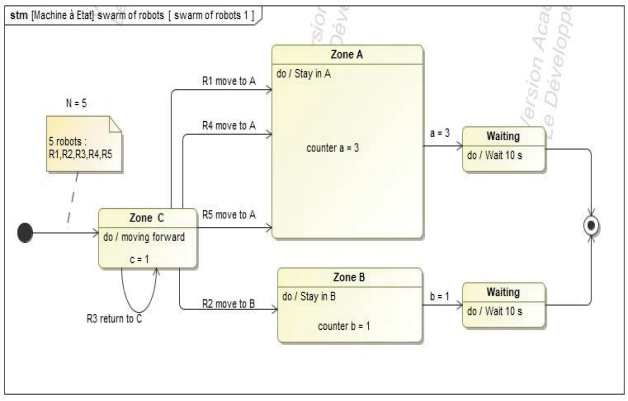


Figure 11: Design process for an instance of 5 Robots

To develop the normative model of the aggregation case study, we use the probabilistic method presented in Figure 12. We consider the three areas in which the environment is divided. We define three states: Sa, Sb and Sc. A robot in zone A or B is in state Sa or Sb, respectively. The robot outside zone A or B is in the state Sc.

A robot in zone C can move either in zone A, or in zone B or stay in zone C. This means that a robot in zone C has a probability of moving from zone C to zone A equal to $P_{ca} = \frac{\mathcal{A}A}{\mathcal{A}\ arena}$, to move from zone C to zone B equal to $P_{cb} = \frac{\mathcal{A}B}{\mathcal{A}\ arena}$, and stay in zone C equal to $P_{cc} = \frac{\mathcal{A}C}{\mathcal{A}\ arena}$

Note that $P_{ca} = P_{cb}$, because the two zones have the same size and Arena is the total zone : $\mathcal{A}_{\text{ arena}} = \mathcal{A}_A + \mathcal{A}_B + \mathcal{A}_C$

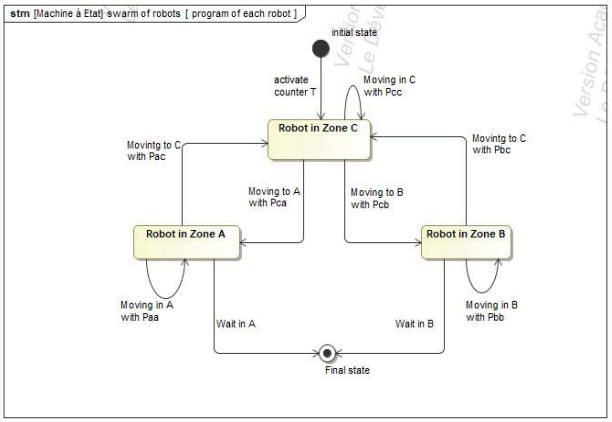


Figure 12: Swarm behaviour with probabilistic Model

The remaining probabilities depend on the behaviour of the robots. The aggregate can be obtained in zone A or zone B, so we fix the probabilities of leaving these two equal zones: Pac = Pbc.

A robot in zone A can only go to zone C or stay in zone A, therefore Paa = 1 - Pac. The same goes for zone B. According to the previous description, it follows that Paa = Pbb. The only remaining independent probability is Pac. With the check model, we can find the value of Pac which maximizes the probability of property 1. Using the simulation model (next step), we can find the best values for the parameter Pac.

Finally, with this current model, we are also able to define the specifications of the hardware capacities of the robots using the block definition diagram illustrated in Figure 13:

- A power supply system made up of batteries and conductive wires.
- A movement system consisting of DC motor, wheels and movement transmission system.
- A communication system between the robots.
- A control system made up of time counters, position sensors and an electrical control card.
- A PLC to install the program.

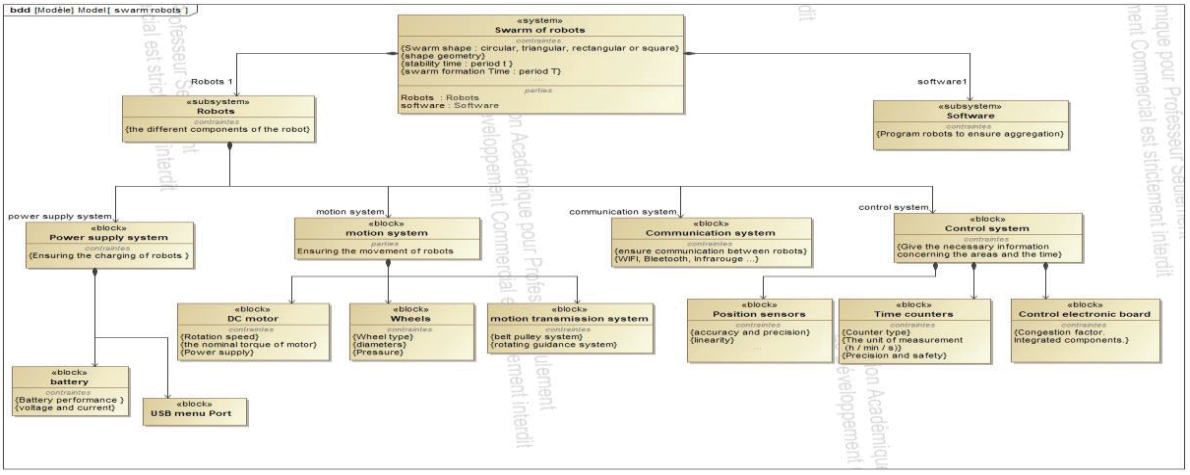


Figure 13: Block Definition Diagram (BDD)

To show the internal organization of the system, we use the Internal Block Diagram. It's a static diagram used to describe the hardware architecture of the system. It represents the instances of the shares of a block. The IBD is framed within the boundaries of the block concerned. The flows of flow (MEI) between the parts are carried out thanks to the connectors which connect their ports. The IBD is defined from the corresponding BDD. A flow enters or leaves on the one hand via a port.

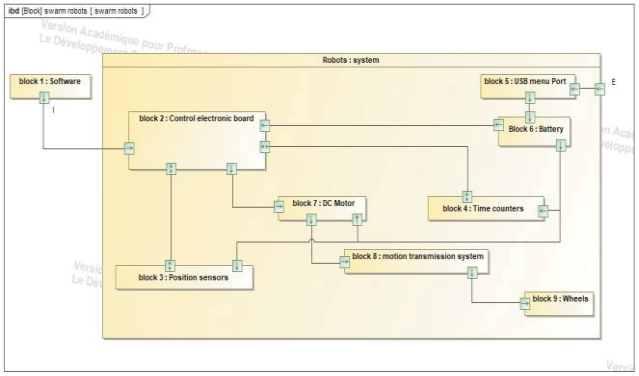


Figure 14: Internal Blocks Diagram (IBD)

Finally, we must verify that the system components described in the BDD respond to the different missions specified in the first phase (sequence diagrams and state machine diagrams). Table 2 links each component of the system with their functions.

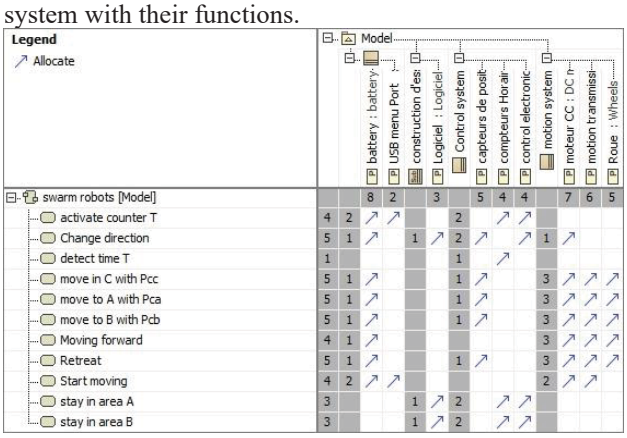


Table 2: Allocation Matrix

4.3 Phase three: Simulation

In this step we used AnyLogic™ as a multi-agent software tool to implement the swarm simulation model. We do two different sets of experiments, one for each group size. To validate our model, we measure the time required to form a complete aggregate. The robots are deployed in a random position at the start of each experiment. Each experiment is interrupted when a complete aggregate is formed or after 1000 seconds of simulation.

Experiment 1

In this example, we want to obtain a probability value for having an aggregate in area A or B (Pr1) equal to 0.8 and the probability of remaining stable for 10 seconds (Pr2) is equal to 0.6.

- P (Pr1) = 0.8
- P (Pr2) = 0.6

For a group of 10 robots, we took the value of Pac = 0.05.

In Table 3, we have calculated the different probabilities.

The parameter		Value
Probability to stay in C	P_{cc}	0.85
Probability to stay in A	P_{aa}	0.95
Probability to stay in B	P_{bb}	0.95
Probability of moving from C to B	P_{cb}	0.08
Probability of moving from C to A	P_{ca}	0.08
Probability of moving from A to C	P_{ac}	0.05
Probability of moving from B to C	P_{bc}	0.05
Waiting time	t	10 s
Execution time	T	1000 s

Table 3: the values of different probabilities for P_{ac}=0.05

We noticed the formation of two aggregates in the two zones A and B: 7 robots are placed in zone A and 3 robots are placed in zone B. In addition, the stability time is equal to 5s.

From the results obtained, we observed that a fixed P_{ac} does not favor the formation of a single aggregate. A better solution is to let a robot decide to leave based on the number of robots detected around it. We set

$P_{ac} = 1 - P_{min-ac} * (Ns + 1)$, where P_{min-ac} is the minimum probability of stay that we want for a robot and Ns is the number of other robots detected. We add 1 to the number of robots detected, because we also include the robot that chooses its next action (M. Brambilla et al, 2014)
We set the value P_{min-ac} in the interval [0.19, 0.24].

The parameter	Value
Probability to stay in C P_{cc}	0.85
Probability to stay in A P_{aa}	0.96
Probability to stay in B P_{bb}	0.96
Probability of moving from C to B P_{cb}	0.08
Probability of moving from C to A P_{ca}	0.08
Probability of moving from A to C P_{ac}	0.04
Probability of moving from B to C P_{bc}	0.04
Waiting time t	10 s
Execution time T	1000 s

Table 4: values of different probabilities for $P_{ac} = 0.04$

We have noticed in figure 15 the formation of an aggregate in zone A: 9 robots are placed in zone A. In addition, the stability time is equal to 7s. So, the two properties (Pr1 and Pr2) are verified.

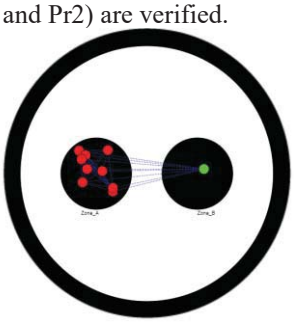


Figure 15: A screenshot of the simulation results of the swarm robot with 10 robots

This figure 16 gives us an idea on the time of start of aggregate formation depending on Pmin-ac.

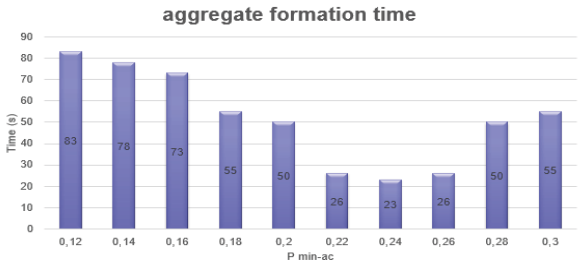


Figure 16: Time to start forming an aggregate for a group of 10 robots

We notice that the best value of P_{min-ac} is in the interval [0.18, 0.28] to obtain an aggregate as quickly as possible.

Results verification

Table 5 shows a comparison between the results obtained and the desired properties.

	Property 1 P(Pr1) = 0.8	Property 2 P(Pr2) = 0.6
Experience 1 (10 robots)	P(Pr1) = 0.9	P(Pr2) = 0.7

Table 5: Verification table of the results obtained

Experiment 2

In this example, we want to obtain a probability of having an aggregate in area A or B (Pr1) equal to 0.4.

- P (Pr1) = 0.4

For a group of 20 robots, we took the value
$P_{min-ac} = 0.12$

In Table 6, we have calculated the different probabilities.

The parameter	Value
Probability to stay in C P_{cc}	0.88
Probability to stay in A P_{aa}	0.6
Probability to stay in B P_{bb}	0.6
Probability of moving from C to B P_{cb}	0.06
Probability of moving from C to A P_{ca}	0.06
Probability of moving from A to C P_{ac}	0.4
Probability of moving from B to C P_{bc}	0.4
Waiting time t	10 s
Execution time T	1000 s

Table 6: Values of different probabilities for $P_{ac} = 0.4$

We have noticed the formation of an aggregate in zone A: 11 robots are placed in zone A.
So, property 1 is verified: P (Pr1) = 0.55

Figure 17 presents the start time for aggregate formation. We notice that the best value of P_{min-ac} is in the interval [0.12, 0.24] to obtain an aggregate as quickly as possible.

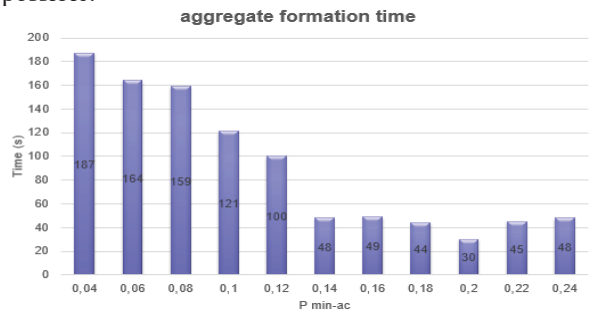


Figure 17: Time to start forming an aggregate for a group of 20 robots

4.4 Phase four: Real robots' implementation

In the last phase, the swarm developer realizes the final swarm robots. In this paper, we have not yet implemented the real robots. This task is undergoing and it could be a subject of a future paper.

5 CONCLUSION

Differently from bottom-up approaches such as code-and-fix technique, our top-down design approach, which is based on the Property Driven Design method and the use of SysML language, offers a systematic methodology towards the development of swarm robotic systems. With our approach, we are able to specify the system requirements to avoid the risk of developing the "wrong" system, that is, a system that does not satisfy the requirements. Our approach facilitates also the

development of a set of simulation and hardware independent models that can be easily reused in future applications.

The simulation results of the aggregation application show that our approach is able to manage easily a large number of robots while ensuring the design continuity process in terms of design traceability.

In the near future, we plan to validate our approach with a real implementation of a swarm robotic system. After that we can apply our design approach to more complex applications. A problem to work on is how to derive the individual behaviour of the robots from a collective behaviour. Several possibilities can be studied, such as the integration of spatial calculation and artificial evolution.

REFERENCES

Batishchev D.I and Isayev S.A, 1997. Optimization of multi functions using genetic algorithms. Interuniversity collection of scientific papers "High technologies in engineering, medicine and education". (Voronezh: VGTU) pp. 4–17.

Bayindir L and Sahin E, 2007. A review of studies in swarm robotics. Turkish Journal of Electrical Engineering, 15(2):115–147.

Bowden N et al, 1997. "Self-Assembly of mesoscale objects into ordered two-dimensional arrays," Science 276(5310), 233– 235.

Blickle T and Thiele L, 1995. A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithm, 2 Edition. TIK-Report. 67 p.

Brambilla M , Pinciroli C, Birattari M, and Dorigo.M 2012. Property-driven design for swarm robotics. In Proceedings of the AAMAS 2012. IFAAMAS, 139–146.

Brambilla M, Ferrante E, Birattari M, and Dorigo M, 2013. Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective. Swarm Intelligence 7, 1, 1–41.

Brambilla M, Dorigo M, and Birattari M, 2014. Property-driven design for robot swarms: Supplementary material.

Brooks R.A, 1986. A robust layered control system for a mobile robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, 2(1):14–23.

Brooks R.A, 1990. Elephants don't play chess. Robotics and autonomous systems, 6(1-2): 3–15.

Cao Y, Fukunaga S, and Kahng A, 1997. "Cooperative mobile robotics: antecedents' directions and," Autonomous Robots, vol.4, no.1, pp.226–234.

Camazine, J.-L. Deneubourg, N. R. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz, and E. Bonabeau, 2001. Self-Organization in Biological Systems. Princeton Studies in Complexity. Princeton University Press, Princeton, NJ.

Dudek G, Jenkin M, Milios E and Wilkes D, 1993. A taxonomy for swarm robots, in: Intelligent Robots and Systems' 93, IROS'93. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on, Vol. 1, IEEE, 1993, pp. 441–447.

Dudek G, Jenkin M, Milios E and Wilkes D,1996. A taxonomy for multi-agent robotics, Autonomous Robots 3 (4) 375–397.

Francesca G, Brambilla M, Brutschy A, Trianni V and Birattari M, 2014. Auto Mo De: a novel approach to the automatic design of control software for robot swarms. Swarm Intell. 8(2) 89– 112.

Fukada T et al, 1998. "Self-Organising Robots Based on Cell Structures," IEEE Int. Workshop on Intelligent Robotics (IEEE Computer Society Press, Los Alamitos.

Iocchi L, Nardi D and Salerno M, 2001. "Reactivity and deliberation: a survey onmulti-robot system," in Balancing Reactivity and Social Deliberationin Multi-Agent Systems. From RoboCup to Real-World Applications, pp. 9–32, Springer, Berlin, Germany.

Jan Carlo Barca and Ahmet Sekercioglu Y, 2012. ''Swarm robotics reviewed'', Robotica (2013) volume 31, pp. 345–359. Cambridge University Press.

Kernbach S, Thenius R, Kernbach O and Schmickl T, 2009. Re-embodiment of honeybee aggregation behaviourin an artificial micro-robotics system. Adapt. Behav. 17(3) 237–259.

Minsky M, 1967. Computation: Finite and Infinite Machines. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

Spears W, Spears D, Hamann J and Heil R, 2004. "Distributed, Physics-Based Control of Swarms of Vehicles", Autonomous Robots, Volume 17(2-3).

Trianni V et al, 2007. "From Solitary to Collective Behaviours: Decision Making and Cooperation," In: Proceedings of the 9th European Conference on Artificial Life (Springer-Verlag, Berlin, Germany).

CONTRIBUTION TO SALES FORECASTING BASED ON RECURRENT NEURAL NETWORK IN THE CONTEXT OF A MOROCCAN COMPANY.

Ghita RGUIGA
LRI Laboratory, OSIL ENSEM, Hassan II University of Casablanca, Casablanca, Morocco
Ghita.rguiga@ensem.ac.ma,

Nabil MOUTTAKI.
LRI Laboratory, OSIL ENSEM, Hassan II University of Casablanca, Casablanca, Morocco
Nabil.mouttaki@ensem.ac.ma

Jamal BENHRA
LRI Laboratory, OSIL ENSEM, Hassan II University of Casablanca, Casablanca, Morocco
jamalbenhra@gmail.com

ABSTRACT:

Forecasting sales is a prerequisite for successful management, this avoids overproduction and therefore costly storage, the objective of this work is to provide a reliable sales forecasting model to help organizations make strategic and operational decisions. Indeed, this work accounts for the profitability of the use of techniques based on artificial intelligence and more precisely the application of recurrent neural networks for a correct prediction of sales. We initially developed the necessary adjustments of this type of algorithm and thereafter we opted for a justified use of the long short term memory (LSTM) techniques of recurrent neural networks for forecasting sales instead of the conventional forecasting methods already used.in this sense, we have proposed a prediction model based on the time series of previous sales which reacts and readjusts the parameters of each sequence.

KEYWORDS:
Forecasting sales model, Artificial intelligence techniques, Machine learning techniques, Production management, Decision support, LSTM.

1- INTRODUCTION

Business growth is nowadays determined by a critical factor which is sales forecasting. It consumes a large portion of managers' time and focus. The majority of large B2B companies engage in forecasting on a weekly basis. forecasts are serving as the basis for planning and executing supply chain activities such as sourcing, making, and distributing products and services to customers. (Huang T. et al,2019)

Over the years, trends such as the globalization of supply chains, the explosion of product variety, the shortening of product life cycles and increasingly competitive markets have made forecasting more complex, yet its role more critical (Tonya B. et al , 2019)

Digital technologies such as advanced Point-of-Sale (POS) systems, the ''Internet of Things" (IoT), and cloud computing (Dey N. et al , 2018) have enabled firms to collect vast amounts of data in real time. Then these vast amounts of data that are collected and analyzed in near real-time have the potential to improve our understanding of customer behavior, improve demand prediction and better execute supply chain management (Tannu et al.,2017)

Data-driven decision-making is the practice of basing decisions on the data analysis, rather than on intuition (Tom F. 2019) In the use of data-driven decision making, companies in the top third of their industry are, on average more productive and more profitable than their competitors.

Since sales forecasting has become a prerequisite for successful management. This work reports the effectiveness of using Recurrent Neural Network LSTMs for sales forecasting instead of classical forecasting methods already employed, use of time series data, forecasting options, and management of forecasting systems.

This paper is presented in several sections. The following section presents a review of previous works on the use of data analysis techniques for sales forecasting. The case study and the analyzed data are described in the third section. The Methodology section provides a description of the methodology followed and the performance

evaluation criteria applied. The fifth section presents all the results obtained as well as a discussion focused on these results, and finally, the conclusions of the work are presented.

2- LITERATURE REVIEW

To explore the issue of sales forecasting, several projects have been developed by researchers over the years, however, to the best of knowledge , the application of deep learning algorithms in sales forecasting is still incipient with a very limited number of published works that we are going to cite in this paper.
A study of (Bohdan P.et al ,2018) Machine-Learning Models for Sales Time Series Forecasting was conducted with a main goal considering approaches and case studies of using machine learning for sales forecasting. The effect of machine-learning generalization has also been considered. This effect can be used to make sales predictions when there is a small amount of historical data for specific sales time series in the case when a new product or store is launched. A stacking approach for building regression ensemble of single models has been studied. The results show that the performance of predictive models for sales time series forecasting can be improved by using stacking techniques.

Furthermore, a research on (Canton et al,2019) Sales Prediction through Neural Networks for a Small Dataset has shown the applicability of neural networks in a case where a company reports a short time-series given the changes in its warehouse structure. Given the neural networks independence form statistical, it uses a multilayer-perceptron to get the sales forecasting of this enterprise. thus, learning rates variations do not significantly increase the computing time, and the validation fails with an error minor to five percent which is a high standard.

Then a work was conducted on (Kalaiarasan T R et al ,2019) Sales Forecasting using RNN which explains the concept of the system architecture of sales forecasting using recurrent neural networks with variant features, the foremost part is based on sales propelled by the sales administrator of a company. Managing the information on the stock and updating the stock value. The generality of RNN is the continuous form of the working part. It is discreetly used for the sales updating norms, amount of product that has been produced, and the wide continuity of product sales in the previous year's till on to the date. the accuracy of these sales forecasting enables companies to take important business decisions and can improve in their performance for the profitable sales , the LSTM (Long Short Term Memory) in this work has been used for classifying, processing and making predictions along with the time series, by which the products are been checked for the sales forecasting and reported by checking up with the time series of previous year's sales of the already existing products, this is the continuous range of checking up the product that is sold that this work has proposed.

In our knowledge , these are the works already lead on prediction of sales ,therefore these works are still limited since the first study is issued by using a small dataset which makes the data non representative ,also as mentioned on the second study , checks are based on the same period of the previous year which doesn't tolerate evolution and changesets ,the third study performs on new products which means that there is no history data , also the use of simple regression limits its performance ,in this work ,forecasting is based on a large amount of records which is necessary for training data using the recurrent neural network LSTMs rather than convolutional networks.

3- CONTEXTUALISATION OF THE STUDY

Since Deep learning is a subset of the field of machine learning, which is a subfield of artificial intelligence (AI), we will discuss in this section the impact of each technology on sales forecasting

3.1- Artificial Intelligence and sales forecasting:

Good sales forecasting helps businesses to grow, But, for many years, forecasting has relied on the human element, emotions and hunches that can make or break a quarter. Just as big data and artificial intelligence (AI) pervade many aspects of how we work, it is doing the same for forecasting. AI equips businesses with improved lead scoring capabilities, enabling them to determine the fate of sales opportunities more accurately, and, ultimately, produce more accurate sales forecasts. AI can sift through large volumes of real-time and historical data and identify the most lucrative sales leads. Using intricate algorithms, AI can fine-tune lead scores by accounting for a multitude of different

factors. Also, AI is driven by machine learning, which means the software trains on data and becomes better over time.

since neural networks have been well proven in the field of prediction, we have chosen to explain their role in sales prediction (Canton,2019).

3.2- Neural Networks and sales forecasting:
However classical models have a significant dependence on statistical assumptions, which diminish their capacity to predict a behavior that was not previously registered. To deal with such problem, Artificial Neural Networks (ANNs) appear as a suitable alternative. These techniques try to mimic neural cells behavior, which makes them non-linear models by nature. Because ANNs are data-driven, they have a self-adaptive feature. This adaptation capacity makes them suitable to analyze problems where data is not complete, or when its documentation was not appropriately gathered (i.e., data with noise). Given that ANNs allow the approximation of almost all non-linear continuous function, they are suitable for sales forecasting. However, in the classical literature, there is not a unique approach to sales forecasting because ANNs may have different structures according to the problem. For example, electricity demand forecasting considers a hybrid structure since data may present seasonal effects

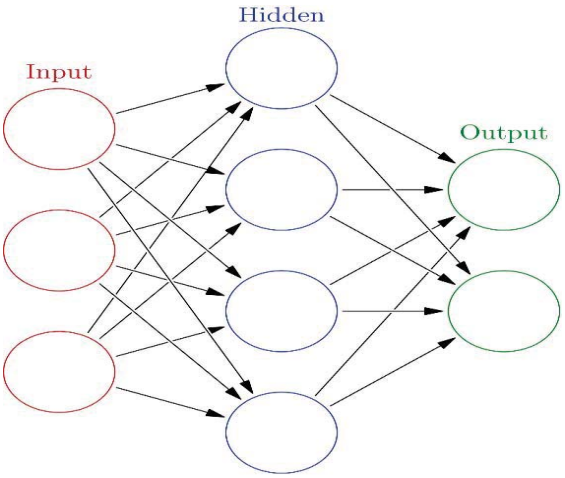


Figure 1 simple neural network graphic

Graphically, an ANN is a graph (figure 1) with neurons (nodes) and their synapses (edges) (Bohdan M.et al, 2019). These models may learn and identify consumers' behavior patterns according to the input data and the architecture of the ANN. The structure of an ANN summarizes the interconnection between neurons, which are organized in layers. The most uncomplicated architecture considers the input layer, the output layer, and the hidden layer, whose objective is the identification and communication of pattern to get the demand forecasting. ANN with only one hidden layer. The hidden layer serves to adjust the importance of the input data in the determination of future behavior. Therefore, it is possible to add as many hidden layers as required.

Although no theoretical tool indicates the optimal number of hidden layers, experiments demonstrate that more than one hidden layer does not significantly improve the prediction's quality. Also, there is a positive relationship between the number of hidden layers and the computing time. Thus, one hidden layer is enough to get a proper prediction, mainly when the database is small.

yet, it will take both the human and technological sides working together to achieve true success.

3.3- Recurrent Neural Networks and sales forecasting:
A Recurrent Neural Network is basically a standard neural network that has been extended across time by having edges which feed into the next time step instead of into the next layer in the same time step. RNN is designed to recognize sequences, for example, a speech signal or a text. It has cycles inside that implies the presence of short memory in the net

One of the issues of the recurrent neural network is related to sequence as a direct cycle is formed with their connections. The next state can be retained using the current output as input for the next step resembling as running a program with standard inputs and selected internal variables (figure 2) (Sharma V,2019)

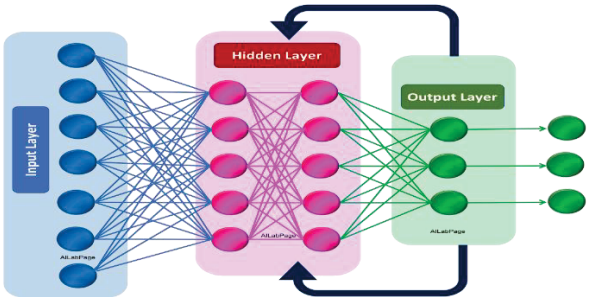


Figure 2 Recurrent Neural Network graphic

Long Short-Term Memory usually just called "LSTMs" (figure 3) (sunny P.,2020). - are a special kind of RNN, capable of learning long-term dependencies. They were introduced by Hoch Reiter & Schmid Huber (1997) (Oikina ,2015), and were refined and popularized by many people in following work. They are widely used on a large set of issued and designed specifically to eliminate long-term dependency. The default behavior LSTM can capture and store information for a longer span of time. The main component of LSTM is the cell state, a horizontal line that keeps running all through. The cell state always runs down the entire chain with less frequent interactions. It is very easy for information to just flow unchanged along with it. LSTM has all the rights to include or exclude the information to the cell state, that are let through by structures called gates. It is a way to decide whether to let the information through or not. It consists of a sigmoid network layer and performs multiplication operation. The output value of the sigmoid layer ranges between zero and one indicating the individual component to decide whether to go through or not. A value zero indicates "let nothing through" and one indicates "let everything through".

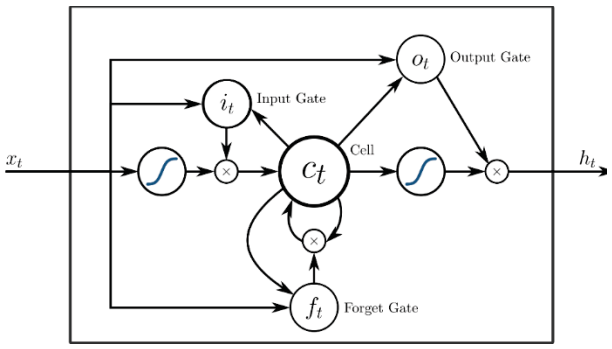


Figure 3 The structure of an LSTM unit

Finally, human side is no more needed to achieve the performance needed since

4- PROBLEM DEFINITION

In this work we are going to present a method for sales forecasting using Recurrent Neural Networks LSTMs based on a data set recorded from a CRM ,and compare the results with prediction made by classical neural network and a recurrent neural network , in this section we are going to present some analysis of the data chosen for experimentation , then the results given by each method of prediction , a comparative study is leaded as well

4.1- Data preparation

Our dataset represents a two years record of a B2C organization's sales for a specific product, the references have been anonymized to protect personal data, privacy, and the legitimate interest of legal persons (figure 4)

	B	D	E	F	G
1	ID_C	Base (dh)	Turnover (dh)	DATE	TYPE
2	2235445	300	320	02/11/2019	4
3	3402737	345	1120	30/10/2019	1
4	3960265	615	1120	30/10/2019	4
5	1933126	1065	1920	30/10/2019	3
6	3596948	1290	2320	30/10/2019	2
7	3643653	80	320	30/10/2019	4
8	2962291	780	1120	30/10/2019	2
9	796964	990	1420	30/10/2019	2
10	3776992	1690	2420	30/10/2019	2
11	925504	2040	2920	30/10/2019	3
12	2773856	1020	1120	30/10/2019	2
13	1368140	1290	1420	27/10/2019	5
14	1333243	2190	2420	27/10/2019	3
15	3959279	2640	2920	27/10/2019	3
16	3864872	48	40	27/10/2019	1
17	1427062	269,58	286,2	19/10/2019	2
18	3162625	210	220	19/10/2019	2
19	3230395	228	240	19/10/2019	4
20	2285745	500	720	19/10/2019	3
21	170822	675	1150	18/10/2019	1
22	1356878	801	1150	18/10/2019	1
23	1745265	1375	1970	18/10/2019	2
24	281904	1662	2380	18/10/2019	3
25	1286761	45	70	18/10/2019	3
26	1975950	9,37	165,1	18/10/2019	1

Figure 4: Data Recorded

The principal component analysis helped finding our target data to get a time series based on the total amount of daily sale (figure 5)

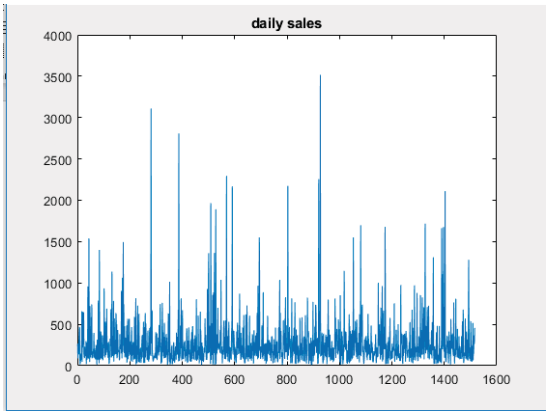


Figure 5: Data Visualization plot

4.2- Training methods for Deep Learning Networks used

There is an abundant amount of great knowledge about deep learning, here are specified the powerful deep learning methods that are applied to our forecasting problem.

4.2.1- Back-Propagation

Back-prop is simply a method to compute the partial derivatives (or gradient) of a function, which has the form as a function composition (as in Neural Nets). When you solve an optimization problem using a gradient-based method (gradient descent is just one of them), you want to compute the function gradient at each iteration.

For a Neural Nets, the objective function has the form of a composition. There are 2 Common ways to compute the gradient:

(i) Analytic differentiation. You know the form of the function. You just compute the derivatives using the chain rule (basic calculus).

(ii) Approximate differentiation using finite difference. This method is computationally expensive because the number of function evaluation is O(N), where N is the number of parameters. This is expensive, compared to analytic differentiation. Finite difference, however, is commonly used to validate a back-prop implementation when debugging.

4.2.2- Levenberg–Marquardt Algorithm

The Levenberg-Marquardt algorithm, also known as the damped least-squares method, has been designed to work specifically with loss functions which take the form of a sum of squared errors. It works without computing the exact Hessian matrix. Instead, it works with the gradient vector and the Jacobian matrix. Consider a loss function which can be expressed as a sum of squared errors of the form.

Batch Normalization

Naturally, neural networks including deep networks require careful tuning of weight initialization and learning parameters. Batch normalization helps relaxing them a little.

4.2.3- Long Short-Term Memory:

The LSTM network has the following three aspects that differentiate it from a usual neuron in a recurrent neural network:

It has control on deciding when to let the input enter the neuron.

It has control on deciding when to remember what was computed in the previous time step.

It has control on deciding when to let the output pass on to the next time stamp.

The strength of the LSTM is that it decides all this based on the current input itself.

4.3- Data processing

At first we experimented prediction with a simple neural network with one hidden layer , a backpropagation network performing on the Levenberg Marquart training method (figure 6) , and since we are based on a time series dataset , a closed loop network(figure 7) has also been experimented considering sequences relationships , last method we used is a recurrent neural network with two LSTM layers

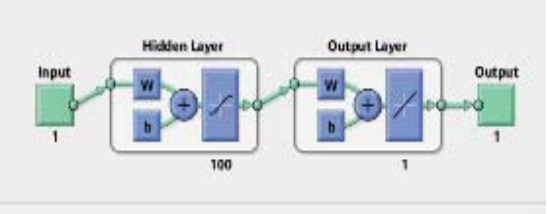


Figure 6: Simple Neural Network

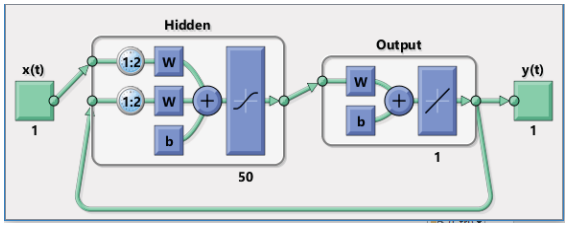


Figure 7 Closed Loop Neural Network

5- RESULTS

5.1-algorithms tuning

we configured the algorithms according to several parameters of which we quote, the number of hidden layers, the number of neurons in each layer and the training methods, then we have retained the best result of root-mean-square error shown in (figure 9) , (figure 11) and (figure 13)

Algorithm	Hidden layer 1	Hidden layer 2	Training method	Performance	Data concatenation
ANN	100	0	Levenberg-Marquart	++	true
ANN	50	30	Backpropagation	--	false
RNN	100	0	Closed loop	--	false
RNN	50	0	Closed loop		true
LSTM	80	100		++	false
LSTM	200	150		++	false
LSTM	100	200		--	false

5.2- Data prediction:

First, we have separated the data for test, training, and prediction proportionally as 70% ,15% and 15%, then we have proceeded to many tunings of the algorithms to get more accuracy on the predicted data.

We configured the algorithms according to several parameters of which we quote, the number of hidden layers, the number of neurons in each layer and the training methods, then we have retained the best result of root-mean-square error shown in (figure 9) , (figure 11) and (figure 13).

After training the models we plotted the original targets , the network predictions and the expected data for the last two months recorded to compare the results , therefore , the training of the simple network (figure 8) and the recurrent (figure 10) one has performed well but not reliable on some periods, instead, the result of the LSTM prediction (figure 12) is stable and nearer to the expected values

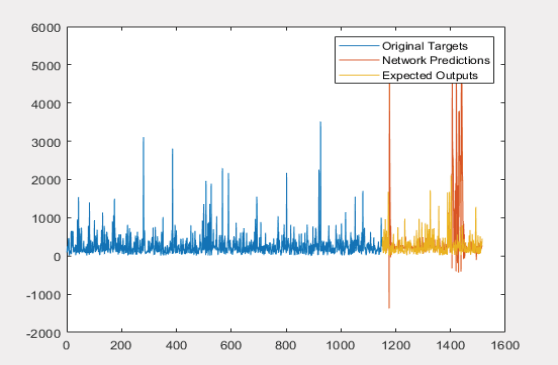


Figure 8 Simple Neural Network Prediction

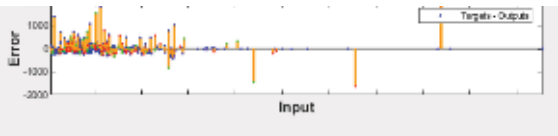


Figure 9: ANN prediction error

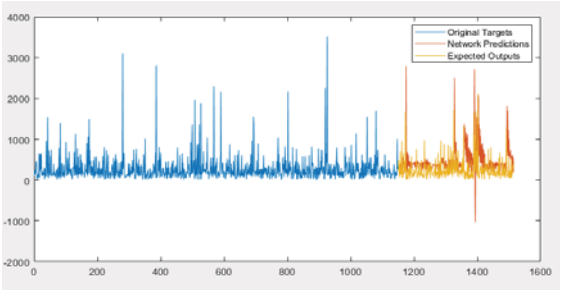


Figure 10: Closed Loop Network Prediction

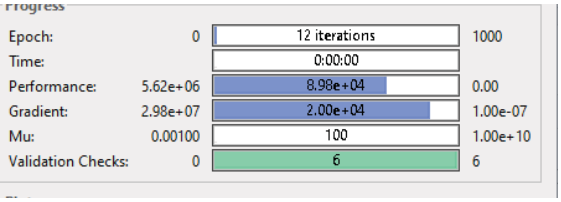


Figure 11: RNN prediction error

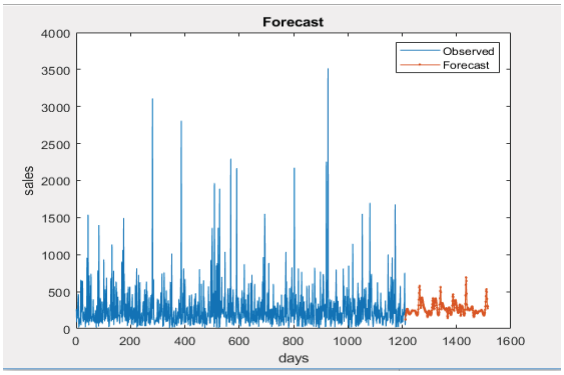


Figure 12: LSTM prediction

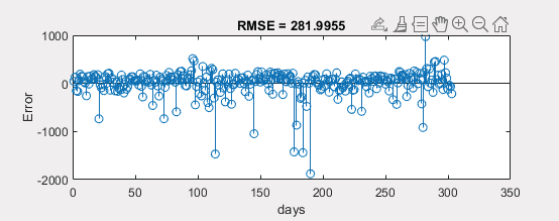


Figure13: LSTM prediction error

5.3- Discussion of the results:

As justified on the previous sequences, the comparative analysis of the different methods used as demonstrated on section 5.1 shows that the LSTMs perform the best on our sales data , and build a reliable model to predict sales for the specific product for the coming months , updating our history with new data.

6- CONCLUSION

This research sheds new light on sales forecasting, by proposing a new prediction model using the recurrent neural network LSTMs, a sequence-based method that reacts and readapt parameters each sequence. This paper includes works on sales forecasting already elaborated by scientists, Regarding these researches, this paper discusses their limits and proposes a model to cope with that ,the objective of this work is to provide a reliable model for sales prediction to help organizations on decision making on both strategic and operational decisions , The model was applied to a recent dataset of recorded sales of a specific product. However, the proposed model can be generalized to be implemented to other products.

Despite the challenges, forecasting is seen as the issue to provide a clearer picture of customer behavior; and can generate accuracy that will help not only to improve the efficiency of the supply chains but also to enhance the company's revenues. we are looking forward to increase interest in prediction technologies and to develop new methods and tools for turning data into more accurate forecasts for use in making actionable operational decisions.

7- PERSPECTIVES

The perspective of this work consists in training the model on other datasets to improve its performance, also to tune the model according to all parameters and get optimal results.

REFERENCES

Bohdan Pavlyshenko. Using Stacking Approaches for Machine Learning Models. In Proceedings of the 2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine, conference paper, August 2018.

Rosa María Cantón, Croda Damian, Omar Caballero, sales prediction through Neural Network for a small dataset, international journal of interactive multimedia and artificial intelligence ,2019

Foster Provost and Tom Fawcett, Data Science for Business: What you need to know about data mining and data-analytic thinking Paperback – 19 Aug. 2013

Foster Provost and Tom Fawcett
Data Science for Business: What You Need to Know about Data Mining and Data-Analytic
ASIN: 1449361323

Huang tao, Robert Fildes, Didier Soopramanien, Forecasting retailer product sales in the presence of structural change, Elsevier, December 2019

Kalaiarasan T R, Anandkumar V, Ratheesh KumarA International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), Sales Forecasting using RNN

Nilanjan Dey, Aboul Ella Hassanien, Chintan Bhatt, Amira S. Ashour and Suresh Chandra Satapathy Internet of Things and Big Data Analytics Toward Next-Generation Intelligence,2018

Oinkina and Hakyll, Understanding LSTM Networks Posted on August 27, 2015

Shaudhary S. What is a simple explanation of a neural network to someone with limited background in machine learning and AI, 2018

Tannu , Indian Journal of Computer Science and Engineering (IJCSE) ,2017

Shaudhary S. What is a simple explanation of a neural network to someone with limited background in machine learning and AI, 2018

Said benkachcha, Jamal Benhra, Hicham El Hassani, Ahmed Haroun Sabry, Amélioration de la gestion des stocks par la fiabilisation de la prévision de la demande Un modèle de prévision basé sur les réseaux de neurones artificiels, conference paper, May 2015

Said Benkachcha,Jamal Benhra, Hicham El Hassani, Seasonal Time Series Forecasting Models based on Artificial Neural Network,2015

Said Benkachcha, Hicham El Hassani, Causal Method and Time Series Forecasting model based on Artificial Neural Network, August 2013International Journal of Computer Applications

Tonya Boone, Ram Ganeshan, Aditya Jain, Nada R. Sanders, Forecasting sales in the supply chain: Consumer analytics in the big data era, 2018 International Institute of Forecasters. Published by Elsevier B.V.

V.Sharma, Deep Learning – Introduction to Recurrent Neural Networks, Posted on January 8, 2019

EVALUATION ENVIRONNEMENTALE COUPLEE A L'ANALYSE MULTIDIMENTIONNELLE DES DONNEES POUR L'ECONOMIE CIRCULAIRE

N. PRIOUX, R. OUARET, Z. CHEN, G. HETREUX et J.-P. BELAUD
Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France
nancy.prioux@ensiacet.fr

RESUME : *L'économie circulaire et ses différentes boucles de recirculation sont devenues ces dernières années un objet d'étude majeur, notamment dans le domaine de l'agriculture qui est un important pourvoyeur de déchets. De nombreuses recherches sont menées pour transformer les déchets lignocellulosiques de l'agriculture par des procédés « durables » c'est-à-dire économiquement viables, socialement acceptés et respectueux de l'environnement. Par la "pensée cycle de vie", il est possible d'évaluer ces impacts environnementaux potentiels. Cependant, ces analyses environnementales nécessitent en général un volume important de données spécifiques, dont la collecte peut être longue et fastidieuse, ou simplement impossible dans la pratique. D'autre part, les articles scientifiques décrivant les procédés de valorisation des coproduits de l'agriculture constituent une source de données intéressante mais peu exploitée. Dans cet article, une approche générale couplant la science des données et l'analyse environnementale est proposée. Composée de cinq étapes, cette approche est orientée vers une aide à la décision pour le chercheur ou l'ingénieur R&D lors d'une étude préliminaire. Elle est mise en œuvre dans le cadre de l'étude des procédés de prétraitements de la tige de maïs et de la paille de riz.*

MOTS-CLES : *Développement durable, Simulation, Analyse du cycle de vie, Science des données, Procédés de prétraitement, Déchets agricoles.*

1 INTRODUCTION ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Il est admis aujourd'hui que nos modes de vie et de consommation ne peuvent conserver le schéma linéaire "extraire, fabriquer, utiliser et jeter" comme modèle principal. C'est pourquoi la Commission Européenne a proposé l'utilisation du modèle d'économie circulaire (EC) pour stimuler l'utilisation de modèles durables (Ellen Macarthur Foundation, 2015). En 2015, le gouvernement français a proposé la SNTEDD (Stratégie Nationale de Transition Ecologique pour le Développement Durable) qui est composée de neuf piliers dont l'EC. Selon l'Agence française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'EC prend en compte trois domaines d'action: (1) la consommation par la demande et le comportement du consommateur, (2) l'offre et les acteurs économiques dont l'écologie industrielle est une voie admise et prometteuse dès la conception initiale d'une zone territoriale (Belaud et al., 2019a) et (3) la gestion des déchets. Ces trois domaines d'action représentent l'ensemble du cycle de vie d'un produit, d'un service ou d'un procédé. Pour obtenir des modèles durables, la pensée *cycle de vie* peut contribuer à améliorer les performances environnementales et à optimiser les avantages économiques et sociaux. Plusieurs méthodes globales sont apparues pour concevoir des procédés de recyclage des déchets qui s'intègrent dans l'économie circulaire (Grimaud et al., 2017). L'agriculture est un domaine particulier dans lesquelles l'EC et la pensée « cycle de vie » se sont développées au cours des dernières décennies.

En France, les industries agroalimentaires produisent environ 2,6 millions de tonnes de déchets organiques par an, un chiffre en constante augmentation (Barry, 2020). Cette tendance s'accompagne de l'augmentation prévue de la population mondiale. Par ailleurs, les activités humaines réduisent la quantité de terres disponibles pour l'agriculture, ce qui a inévitablement des répercussions sur les systèmes agricoles. Bien que la biomasse lignocellulosique soit une ressource renouvelable, les procédés de transformation se doivent d'être durables pour participer au développement durable. Au cours des trente dernières années, de nombreux procédés de prétraitement ont été étudiés et publiés (Davis et al., 2017). Cependant, il y a un manque de critères pour guider le choix entre tous ces procédés. Le recours à l'évaluation environnementale, économique et sociale dans un contexte d'EC est un bon moyen d'orienter ce choix. Ces évaluations nécessitent de nombreuses données, en particulier des données techniques sur les procédés potentiellement disponibles dans les articles scientifiques.

Sans les outils adaptés, il est cependant difficile de pouvoir traiter un grand nombre de données. C'est pourquoi avec l'arrivée du « Big Data » ou « données massives » de nombreux outils et méthodes ont été créés. Les évaluations environnementales telle que l'analyse du cycle de vie (ACV) bénéficieraient clairement de ces technologies pour analyser les données des procédés et les résultats de ces évaluations. Quelques études utilisent les données massives pour compléter l'ACV. J. Cooper et al. utilisent les données massives pour compléter les données d'arrière-plan (Cooper et al., 2013). La proposition DILCA (Data-intensive Life Cycle Assessment) exploite l'ingénierie des connaissances (IC) et intègre les développements technologiques qui peuvent modifier les résultats de l'ACV pour un produit donné au fil du temps (Bhinge et al., 2015)

Le but de cet article est de présenter une approche d'aide à l'analyse et à la comparaison de différents procédés de prétraitement de la biomasse lignocellulosique et de différentes biomasses dans le contexte de l'économie circulaire. Cette approche est prévue pour le chercheur ou l'ingénieur R&D qui voudrait faire un premier tri dans les procédés de prétraitement ou les biomasses grâce aux données contenues dans la littérature scientifique. Elle peut être déployée lors d'une phase d'étude préliminaire et servir d'aide à une première décision pour le développement d'un pilote de laboratoire ou semi-industriel. Après une introduction des différentes méthodes utilisées dans notre approche, le paragraphe 2 expose cette approche générale. Le paragraphe 3 traite de l'étude de différents prétraitements de la paille de riz et la tige de maïs puis, fournit les résultats et les interprétations.

2 APPROCHE METHODOLOGIQUE

2.1 Méthodes

L'approche couple deux domaines distincts que sont la science des données et l'analyse environnementale. De nombreuses données de nature différente et issues de sources hétérogènes sont nécessaires pour l'analyse environnementale. Par exemple, les données procédés sont issues du web public au travers des articles scientifiques et constituent une base de données non structurée alors que les données d'arrière-plan sont disponibles dans des bases de données structurées (publiques ou privées) comme EcoInvent (Frischknecht et al., 2005). La science des données va fournir des méthodes et technologies adaptées pour cette analyse. L'objectif principal de cette approche est d'analyser différentes voies technologiques des procédés et de fournir une aide à la décision par l'analyse des résultats.

Le choix pour l'analyse environnementale s'est porté sur la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV) (ISO 14040:2006, 2006). L'ACV comprend quatre étapes : la définition de l'objectif et du champ d'étude, l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) et l'analyse et l'interprétation des résultats. Cette dernière étape de l'ACV est « délicate » pour des novices voire des experts. Il peut donc être profitable d'enrichir la méthode ACV pour aider le chercheur ou l'ingénieur à analyser et interpréter.

La littérature enseigne que les méthodes les plus appliquées pour l'analyse des résultats sont établies principalement sur la connaissance, l'expertise et la prise de décision multicritère. Il existe quelques études récentes menées à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique. Par exemple, (Kouchaki-Penchah et al., 2017) et (Zhao et al., 2019) ont combiné l'analyse par enveloppement des données (DEA) et l'ACV. Romeiko et al ont utilisé des modèles de régression arborescente accélérée pour identifier les principaux facteurs influents parmi les sols, le climat et les pratiques agricoles, qui déterminent l'hétérogénéité spatiale et temporelle des impacts environnementaux du cycle de vie (Romeiko et al., 2020).

Les méthodes d'apprentissage utilisées pour l'évaluation générale de la durabilité sont en général « supervisées ». Dans ce cas de figure, la prédiction (régression ou classification) se fait à partir des données « annotées » (Abdella et al., 2020). Par contre, dans de nombreux cas, les données ne sont pas « annotées » et l'objectif est d'extraire des classes de variables/échantillons présentant des caractéristiques communes. Pour mettre en évidence les similarités entre les différents procédés, les différentes biomasses ainsi que les similarités entre les impacts environnementaux, notre axe de travail repose sur l'utilisation de techniques de réduction de la dimension (DR). Plusieurs stratégies ont été explorées pour atteindre cet objectif en utilisant l'apprentissage « non supervisé » qui comprend la réduction de la dimension et le regroupement des données.

2.2 Approche générale

L'approche présentée dans ce papier repose sur une architecture générale prenant en compte les piliers de la durabilité (Belaud et al., 2019b). Cette approche est divisée en cinq grandes étapes (Figure 1). Chaque étape possède des sous-étapes et le passage de l'une à l'autre peut se faire dans un sens ou dans l'autre par des boucles de rétroaction. Il est recommandé d'itérer afin de consolider les résultats et donc les choix qui découlent de leurs interprétations.

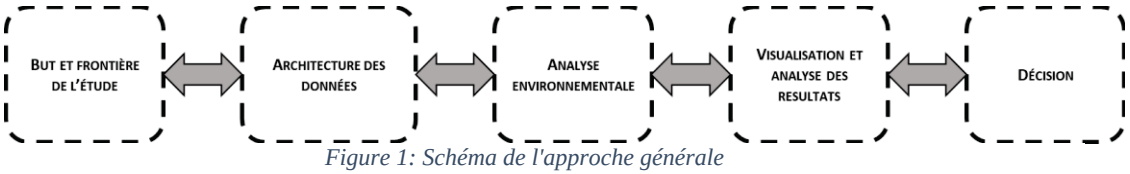


Figure 1: Schéma de l'approche générale

Dans la première étape, les *but et frontière de l'étude* doivent être clairement définis. La pensée cycle de vie est recommandée. Cette pensée encourage une approche du « berceau à la tombe » voire « du berceau à la porte » si la logistique avale d'une chaine de valeur est difficilement accessible. Les limites d'un système et l'unité fonctionnelle sont ensuite détaillées. Elles peuvent influer grandement les évaluations. Par exemple, il faut préciser si la chaîne d'approvisionnement de la biomasse en amont est prise en compte. Une fois l'objectif et le champ d'application proprement définis, la chaîne d'approvisionnement, les technologies et les procédés de transformation doivent être décrits.

L'architecture des données est directement inspirée de la construction de l'architecture des données massives et comportent cinq sous étapes : (i) la collection et l'extraction des données, (ii) l'enrichissement et le stockage des données, (iii) le traitement des données, (iv) l'analyse des données (brutes) et (v) la visualisation des données (brutes). Cette étape permet de collecter, stocker et traiter toutes les données dont l'analyse environnementale aura besoin. Ces données sont divisées en deux groupes : les données procédés (dites de premier plan) qui sont extraites de la littérature scientifique et les données d'arrière-plan issues de bases de données libres ou commerciales comme EcoInvent. Cette étape (qui n'est pas documentée dans la section 3) utilise des outils de la science des données comme l'ingénierie des connaissances pour la collection et l'extraction des données.

Vient alors l'étape de *l'analyse environnementale* qui permet d'obtenir des impacts environnementaux à partir des données traitées issues de l'étape précédente. Ici, c'est l'ACV qui est sélectionnée. Une fois l'inventaire du cycle de vie (ICV) effectué, une ou plusieurs méthodes de calcul des impacts doivent être déterminées en accord avec la première étape qui intègre la nature de l'étude et du système. A la fin de cette étape, le résultat principal est une structure [procédés : biomasses : impacts] qui est difficile d'analyser.

L'étape de *visualisation et d'analyse des résultats* va apporter les méthodes issues de l'intelligence artificielle et plus précisément du « machine learning » pour aider à l'analyse de cette structure. A partir de la littérature statistique, sont combinées les techniques traditionnelles de réduction des dimensions et de classification non supervisé pour extraire les informations sur l'analyse des impacts du cycle de vie (AICV). Plus précisément, l'approche hybride est basée sur l'échelle multidimensionnelle (MDS) en utilisant la distance de Canberra et les *k*-moyennes. L'objectif est de rechercher des structures "cachées" dans les données multidimensionnelles et d'aider à interpréter la zone de points terminaux groupés de la matrice d'évaluation AICV. L'avantage de cette approche est que les méthodes basées sur les données nécessitent très peu de connaissances des procédés pour effectuer cette tâche. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** résume le traitement pour une structure [procédés : impacts] qui est exploitée dans l'étude présentée dans le paragraphe 3.

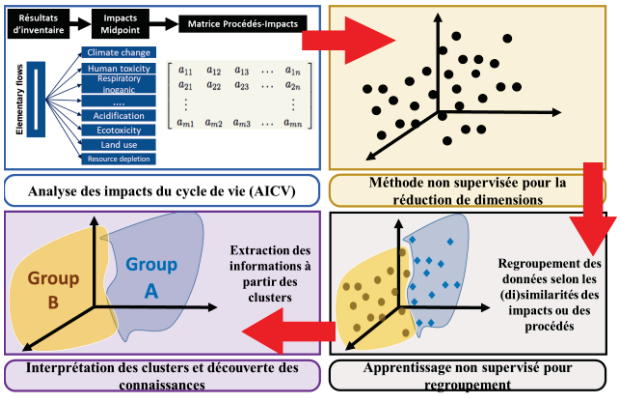


Figure 2 : Schéma du traitement des données pour l'AICV

La structure [procédés : biomasse : impacts] est d'abord utilisée comme entrée (matrice de similarité) pour tirer des enseignements des données qui sont les résultats de l'étape précédente. Deuxièmement, les techniques de DR projettent les données brutes du procédé dans un espace dimensionnel inférieur (2 ou 3). Le sens de dimension ici est celui de l'algèbre linéaire : la dimension de l'espace vectoriel sous-jacent des variables. Après une projection des données par une technique de DR, l'approche de regroupement est alors appliquée pour considérer les impacts, les biomasses similaires ainsi que dans les procédés au sein de l'espace dimensionnel inférieur. Enfin, l'utilisateur (expert) analyse les points regroupés en clusters pour les relier à des procédés/impacts/biomasses significatifs. Cette dernière étape d'affectation des clusters et d'extraction des informations est appelée « *découverte de connaissances* ».

La visualisation des clusters des données (résultats de l'étape précédente) va pouvoir aider le chercheur ou l'ingénieur R&D dans l'étape finale de *décision*. Cette décision peut être prise par un individu ou un groupe multidisciplinaire selon différentes techniques de prise de décision collaborative.

3 APPLICATION ET RESULTATS

Dans cette partie, les premiers résultats de notre approche sont présentés avec objet d'étude la comparaison de différents procédés de prétraitements de deux biomasses : la tige de maïs et la paille de riz. Ce paragraphe illustre la première étape de la méthode ie les *but et frontières de l'étude*. Cette étude examine quinze procédés provenant de quinze articles scientifiques. La Figure 3**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre un de ces procédés de prétraitement. Le but de l'étude est d'aider le chercheur ou l'ingénieur R&D à choisir un procédé et/ou une biomasse pour la production de glucose. La pensée cycle de vie est du « berceau à la porte » c'est-à-dire que les frontières de l'étude sont de la biomasse à l'étape de l'hydrolyse enzymatique. La biomasse étant ici un déchet (voué à devenir un coproduit) de l'agriculture, elle comporte un impact nul – les impacts de la phase agricole sont imputés au produit final valorisé de l'agriculture (le maïs et le riz). La bioraffinerie est considérée relativement à proximité du champ, l'étape de transport étant alors négligeable. La fonction principale du système est la production du glucose. L'unité fonctionnelle est alors la « production de 1 kg de glucose » et tous les résultats sont exprimés en unité fonctionnelle.

Nous passons ici à la seconde étape l'architecture des données. Cette étape décrite ici succinctement est approfondie dans (Belaud et al., 2019b). La sélection des articles décrivant les procédés ayant comme intrant la tige de maïs ou la paille de riz est effectuée par des experts du domaine. Dix-huit articles sont sélectionnés dans un premier temps et extraits des bases de données scientifiques telles que Web of science et Science Direct. Les données des articles sont extraites de manière semi-automatique

dans une ontologie. L'ontologie structure les données procédés et assure un export en fichiers CSV alimentant un logiciel interne. Ce logiciel développé sur MS Excel réalise un premier « nettoyage » des données par la simulation des procédés pour calculer et vérifier le bilan matière.

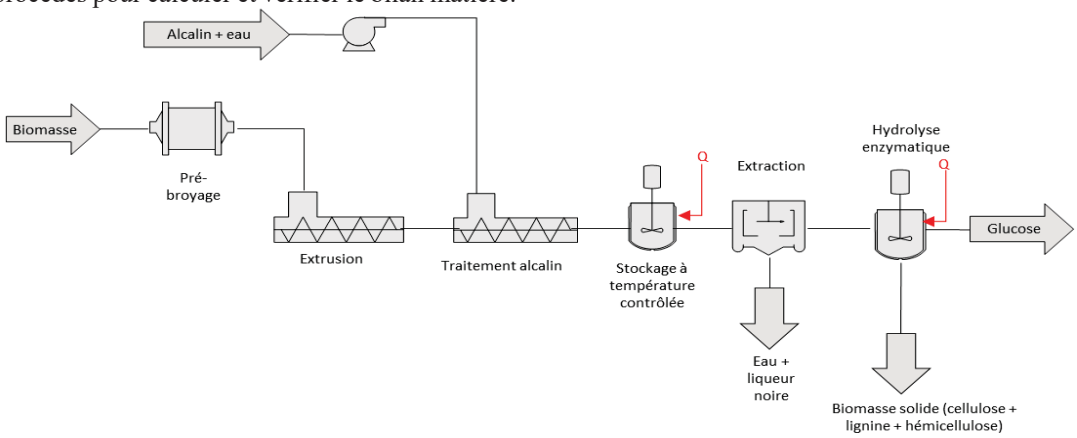


Figure 3 : Exemple d'un procédé de prétraitement étudié adapté de (Liu et al., 2013)

Ce nettoyage peut consister à des suppressions ou des modifications de valeurs. Par exemple, les données de 3 articles sont retirées de notre étude car ils présentent des incohérences ou de nombreuses données manquantes ce qui ne permet pas les vérifications par la simulation. L'étude analyse donc 15 procédés par 2 biomasses. L'évaluation environnementale utilise une méthode ACV (attributionnelle) : ReCiPe 2016, la base de données d'arrière-plan est EcoInvent v2.2 et les données de premier plan sont les données procédés « nettoyées ». L'évaluation environnementale conduit au calcul de 17 impacts dit « midpoint ». L'outil Excel a été validé à l'aide du simulateur commercial ProSim+ pour la simulation des procédés et de SimaPro® pour la partie simulation des impacts environnementaux. La matrice des résultats [impacts : procédés] est ensuite analysée par positionnement multidimensionnel en exploitant R (R Core Team, 2020). La Figure 4 montre l'enchainement des outils, l'interopérabilité à couplage faible étant assurée par fichiers CSV.

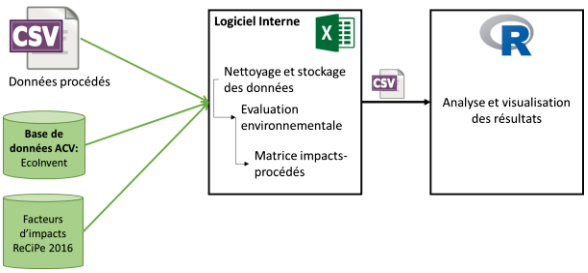


Figure 4: Schéma des outils logiciel

La dernière étape *Analyse et visualisation des résultats*, constituant le thème principal de ce papier, est maintenant décrite. Le positionnement multidimensionnel (MDS) classique, appelé aussi Principal Coordinates Analysis (PCoA) est une méthode de visualisation des (dé)similarités entre des objets dans un espace de dimension réduite. Elle est conçue pour permettre de comprendre les structures de proximités et d'opposition. Partant des informations sur les ressemblances mutuelles de n objets, souvent avec la matrice de similarité ou $\Delta = \delta(i,j)_{0\leq i\leq n;0\leq j\leq n}$, on cherche une configuration de n points (dans $\mathbb{R}^2$ en général) qui soit telle que si l'objet i ressemble à j plus que l'objet ℓ à k, on ait $\delta(i,j) < \delta(\ell,k)$. Pour n'importe quelle matrice de distance de taille $n \times n$, la MDS permet de trouver un ensemble de n points repérés par leur coordonnées dont la matrice de similarité est égale ou très proche des données. Dans notre approche, nous utilisons la distance de Canberra (Lance and Williams, 1967, 1966), une version pondérée de la distance de Manhattan.

Soient $\boldsymbol{x}_r$ $(r = 1,\ldots,n)$ les coordonnées de n points dans un espace euclidien de p dimensions données où $\boldsymbol{x}_r = (x_{r1}, x_{r2}, \ldots, x_{rp})^\top$ et $[\boldsymbol{B}]_{rs} = \boldsymbol{b}_{rs} = \boldsymbol{x}_r^\top \boldsymbol{x}_s$. Pour une distance euclidienne $\Delta = \delta_{rs}$, à partir d'une matrice $\boldsymbol{A}$ d'éléments $[\boldsymbol{A}]_{rs} = \boldsymbol{a}_{rs} = -\frac{1}{2}\delta_{rs}^2$, déduite de la décomposition $\boldsymbol{x}_r^\top \boldsymbol{x}_s$, la matrice $\boldsymbol{B}$ est obtenue en utilisant la relation suivante :

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{HAH} \quad (1)$$

où $\boldsymbol{H}$ est matrice *centrage* : $\boldsymbol{H} = \boldsymbol{I} - n^{-1}\mathbb{I}\cdot\mathbb{I}^\top$ avec $\mathbb{I} = (1,1,\ldots,n)^\top$. Les éléments de $\boldsymbol{A}$ sont définis comme suite :

$$a_{r\bullet} = n^{-1}\sum_s a_{rs}$$

$$a_{\bullet s} = n^{-1}\sum_r a_{rs} \text{ et}$$

$$a_{\bullet\bullet} = n^{-1}\sum_r\sum_s a_{rs}$$

La procédure algorithmique du positionnement multidimensionnel peut être résumée, comme illustrée dans (Cox and Cox, 2001) par les étapes suivantes :

1. obtenir la matrice de proximité $\Delta = \delta_{rs}$
2. trouver la matrice $\boldsymbol{A} = [-\frac{1}{2}\delta_{rs}^2]$
3. trouver la matrice $\boldsymbol{B} = [a_{rs} - a_{r\bullet} - a_{\bullet s} + a_{\bullet\bullet}]$
4. trouver les valeurs propres $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{n-1}$ et les vecteurs propres $v_1, v_2, \ldots, v_{n-1}$

   si $\boldsymbol{B}$ est semi-définie positive (certaines valeurs propres sont négatives), soit (i) ignorer les valeurs

négatives et continuer, ou (ii) ajouter une constante appropriée c aux (dis)similarités

5. choisir un nombre de dimension approprié ℓ, utilisation possible de $\frac{\sum_1^\ell \lambda_i}{\sum(\text{valeurs propres positives})}$.
6. les coordonnées des n points dans l'espace euclidien de dimension ℓ sont données par $\boldsymbol{x_{ri}} = v_{ir}$ $(r = 1,\dots,n;\ i = 1,\dots,\ell)$.

L'interprétation d'un résultat de MDS est le même que pour toute autre méthode de réduction de dimension : les objets qui sont plus proches sur le nuage de points sont plus semblables que ceux qui sont plus éloignés. C'est-à-dire que les points projetés sont disposés de telle manière que les points groupés (petite distance entre eux) reflètent les relations originales dans les données. Cependant, des informations supplémentaires sont nécessaires pour rendre la projection plus informative. Comme l'illustre la Figure 2, un algorithme de regroupement (k-moyennes) a été appliqué à la projection MDS pour mettre en évidence les objets les plus similaires (Impacts - Procédés). Les cartes des impacts et des procédés agrégés en deux dimensions sont présentées à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure 5. Pour le diagramme de dispersion des points d'impacts (Figure 5 gauche), nous pouvons distinguer trois groupes en utilisant des k-moyennes k :

- Groupe 1 : acidification terrestre (TA), eutrophisation de l'eau douce (FrEu), écotoxicité terrestre (TecoX) et écotoxicité de l'eau douce (FrEco). On retrouve dans ce groupe presque tous les impacts qui concernent la pollution chimique des sols et étendues d'eau.
- Groupe 2 : toxicité humaine (HT), tormation de particules (PM), changement climatique partie santé humaine (CCHH), écotoxicité marine (MaEco), appauvrissement des métaux (MeDe), appauvrissement des fossiles (FossDe), changement climatique partie écosystèmes (CCE) et rayonnement ionisant (IR). Ce groupe forme trois sous-groupes avec des points superposés (dans la perspective 2-D). Cela suggère que ces points sont très similaires en se basant sur la distance de Canberra. Ici, on retrouve un groupe assez hétérogène où se retrouvent les impacts non présents dans les groupes 1 et 3.
- Groupe 3 : occupation des terres urbaines (UrbLOcc), formation d'oxydants photochimiques (Pohto_ChOx), occupation des terres agricoles (AgLOcc), appauvrissement de la couche d'ozone (OD) et transformation naturelle des terres (NLTran). Dans ce groupe se retrouve principalement les impacts liés à l'occupation et la transformation des sols.

Des comparaisons similaires peuvent être faites entre tous les ensembles d'impacts. Les résultats de k-moyennes des éléments des procédés projetés (Figure 5 droite) sont similaires à ceux obtenus pour les impacts (Figure 5 gauche). Les acronymes légendant les points représentent chaque type de procédés. Ceux-ci ne seront pas explicités ici. Trois groupes distincts de procédés peuvent être identifier. Cependant, des clusters très serrés et très séparés apparaissent dans les données des procédés, ce qui peut suggérer que chaque cluster est un domaine ou un sous-domaine qui doit être analysé individuellement. Dans le groupe 3 par exemple on retrouve deux prétraitements purement mécanique (PM-UFM pour « pre-miling and ultra-fine milling »). En remontant jusqu'aux impacts on retrouve que ces deux prétraitements ont un impact sur l'appauvrissement des fossiles très important par rapport aux autres. Pour le groupe 1, les trois prétraitements ont des impacts relativement similaires pour tous les impacts et pour l'appauvrissement des fossiles on retrouve un impact autour de la dizaine de $ alors que les prétraitements du groupe 2 ont un impact autour de 1$. Alors que la visua-

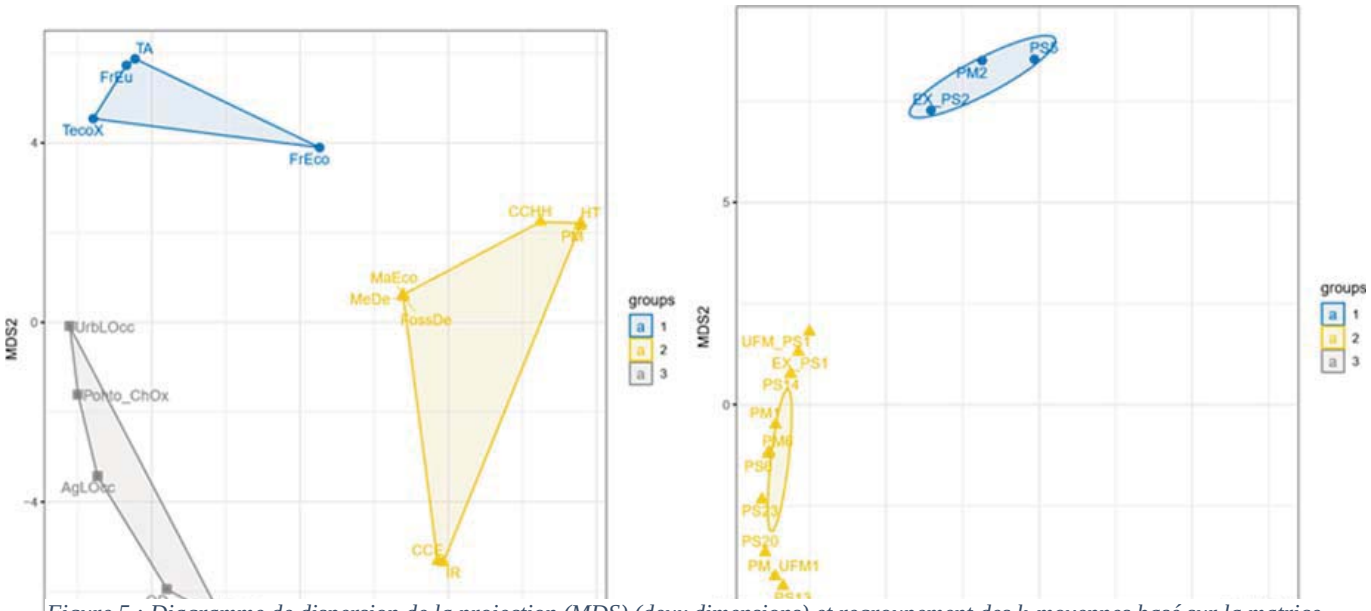


Figure 5 : Diagramme de dispersion de la projection (MDS) (deux dimensions) et regroupement des k-moyennes basé sur la matrice de distance des impacts (à gauche) et la matrice de distance des procédés (à droite).

lisation est le résultat de l'approche, on retrouve une interprétation que pourrait réaliser un expert ACV et procédés de prétraitement en exploitant la méthode ACV usuelle. Ces résultats ne sont cependant que partiels. En effet, on n'utilise qu'une représentation de la dimension 1 par rapport à la dimension 2 ce qui donne un pourcentage de représentativité faible et donc une perte d'informations. Il est envisagé de prolonger cette étude afin de représenter les dimensions 3 et 4 et compléter l'analyse.

4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une approche couplant la science des données et l'analyse environnementale est proposée. Composée de cinq étapes cette approche est présentée comme une aide pour le chercheur ou l'ingénieur R&D lors d'une étude préliminaire. Elle permet un gain de temps, une moindre expertise et aucune mise en œuvre expérimentale directe (partant du principe que les données scientifiques de premier plan existent et sont accessibles au sens « big data »). Cette approche est testée par l'étude de la valorisation de déchets agricoles pour promouvoir une économie circulaire en boucle locale. Cette application exécute les quatre premières étapes de l'approche. Elle compare différentes technologies de procédés de prétraitement de deux biomasses lignocellulosiques transformées en glucose, la tige de maïs et la paille de riz. Suite aux étapes de *but et frontière de l'étude*, *architecture des données* et *analyse environnementale*, une matrice impacts-procédés est analysée dans l'étape *visualisation et analyse des résultats* au travers de la méthode positionnement multidimensionnelle (MDS). L'approche fournit des premiers enseignements pour trier par groupes et établir une présélection de technologies ou de biomasses de manière rigoureuse et poursuivre le développement technologique sur des échelles de TRL supérieures.

Cette application révèle différentes limites. Les données issues de la littérature scientifique sont par nature des données issues de série d'expérimentations batch en laboratoire. L'analyse du cycle de vie est donc exécutée pour un niveau bas de maturité technologique (TRL 1/2). L'approche n'intègre pas le changement d'échelle nécessaire à la mise en œuvre d'un pilote semi-industriel, spécialement si le procédé devient semi-continu. Une autre limite est l'abondance et la qualité des données qui peuvent s'avérer insuffisantes pour des nouvelles voies technologues. D'autres axes de progrès sont de reconsidérer l'unité fonctionnelle, la stratégie de l'analyse environnementale globale par l'intégration de la phase amont agricole (ACV conséquentielle, politique d'allocation et d'extension de système) et la prise en compte de la chaine logistique globale selon une analyse dynamique c'est-à-dire spatiale voire temporelle (Er-Raki et al., 2019). Particulièrement la biomasse lignocellullosique issue de l'amont agricole peut être d'une qualité et d'un approvisionnement variables.

Egalement, la politique des impacts relatifs aux effluents peut être modifiée. Tous les impacts sont attribués au produit final (le glucose). Or, selon le devenir de ces effluents et leur valorisation au sens économie circulaire, l'interprétation des voies technologiques et des intrants peut différer.

REFERENCES

Abdella, G.M., Kucukvar, M., Onat, N.C., Al-Yafay, H.M., Bulak, M.E., 2020. Sustainability assessment and modeling based on supervised machine learning techniques: The case for food consumption. J. Clean. Prod. 251, 119661. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119661

Barry, C., 2020. La production de déchets non dangereux dans les industries agroalimentaires, Primeur. Agreste.

Belaud, J.-P., Adoue, C., Vialle, C., Chorro, A., Sablayrolles, C., 2019a. A circular economy and industrial ecology toolbox for developing an eco-industrial park: perspectives from French policy. Clean Technol. Environ. Policy 21, 967–985. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01677-1

Belaud, J.-P., Prioux, N., Vialle, C., Sablayrolles, C., 2019b. Big data for agri-food 4.0: Application to sustainability management for by-products supply chain. Comput. Ind. 111, 41–50. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.006

Bhinge, R., Srinivasan, A., Robinson, S., Dornfeld, D., 2015. Data-intensive Life Cycle Assessment (DILCA) for Deteriorating Products. Procedia CIRP 29, 396–401. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.192

Cooper, J., Noon, M., Jones, C., Kahn, E., Arbuckle, P., 2013. Big Data in Life Cycle Assessment: Big Data in Life Cycle Assessment. J. Ind. Ecol. 17, 796–799. https://doi.org/10.1111/jiec.12069

Cox, T.F., Cox, M.A.A., 2001. Multidimensional scaling. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton.

Davis, C.B., Aid, G., Zhu, B., 2017. Secondary Resources in the Bio-Based Economy: A Computer Assisted Survey of Value Pathways in Academic Literature. Waste Biomass Valorization 8, 2229–2246. https://doi.org/10.1007/s12649-017-9975-0

Ellen Macarthur Foundation, 2015. Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition. Ellen Macarthur Foundation.

Er-Raki, A., Hartmann, D., Negny, S., Belaud, J.-P., 2019. Comparison of static and dynamic approaches in LCA: review and application. Presented at the International Conference on Industrial Ecology and Life Cycle Assessment, ICIELCA 2019, Rome, Italy.

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., 2005. The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp). Int. J. Life Cycle Assess. 10, 3–9. https://doi.org/10.1065/lca2004.10.181.1

Grimaud, G., Perry, N., Laratte, B., 2017. Decision Support Methodology for Designing Sustainable Recycling Process Based on ETV Standards. Procedia Manuf. 7, 72–78. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.020

Kouchaki-Penchah, H., Nabavi-Pelesaraei, A., O'Dwyer, J., Sharifi, M., 2017. Environmental management of tea production using joint of life cycle assessment and data envelopment analysis approaches. Environ. Prog. Sustain. Energy 36, 1116–1122. https://doi.org/10.1002/ep.12550

Lance, G.N., Williams, W.T., 1967. Mixed-data classificatory programs i - agglomerative systems. Aust. Comput. J. 1, 15–20.

Lance, G.N., Williams, W.T., 1966. Computer programs for hierarchical polythetic classification ("similarity analyses"). Comput. J. 9, 60–64.

Romeiko, X.X., Lee, E.K., Sorunmu, Y., Zhang, X., 2020. Spatially and Temporally Explicit Life Cycle Environmental Impacts of Soybean Production in the U.S. Midwest. Environ. Sci. Technol. 54, 4758–4768. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06874

Zhao, L., Zha, Y., Zhuang, Y., Liang, L., 2019. Data envelopment analysis for sustainability evaluation in China: Tackling the economic, environmental, and social dimensions. Eur. J. Oper. Res. 275, 1083–1095. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.004

VALUE STREAM MAPPING 4.0: A STRUCTURAL MODELING APPROACH

Rania EL KAMMOUNI, Oualid KAMACH

Laboratory of Innovative Technologies (LIT)
University Abdelmalek Essaadi Tangier
ENSA of Tangier, Morocco
rania.elkammouni@etu.uae.ac.ma,
kamach@ensat.ac.ma

Malek MASMOUDI

Faculty of Sciences and Techniques,
University Jean Monnet Saint-Etienne
University of Lyon, Saint-Etienne, France
malek.masmoudi@univ-st-etienne.fr

ABSTRACT: *This article presents a new methodology VSM 4.0 (Value Stream Mapping 4.0) which is a digital and collaborative working environment for lean management teams in the era of Industry 4.0. The VSM 4.0 supports business leaders in the optimization of the production process by digitizing the value stream. It is based on a systems engineering approach adopted for their modeling, this tool will enable the optimization of the production process by digitizing the value stream. The idea focuses on higher levels of digitization, integration, and automation of information and material flows for a plant and beyond.*
Systems engineering methods have also been called upon in this paper to address the complexity of system modeling and increasing system dynamics.

KEYWORDS: *Industry 4.0; Value Stream Mapping 4.0; Systems engineering; Systems modelling; AutomationML.*

1 INTRODUCTION

For more than thirty years, companies have widely adopted the Lean manufacturing spirit to continuously improve their operations. Moving towards the fusion of digital and physical systems as part of the transition to Industry 4.0 or the fourth industrial revolution that is taking shape following the three major devolution phases described as revolutions: mechanization, industrialization, automation (Alasdair Gilchrist, 2016). This fourth revolution, Industry 4.0 refers to a new generation of connected, and intelligent factories. It is a digital transformation that is shaking up the manufacturing company, fundamentally characterized by intelligent automation and by the integration of new technologies into the company's value chain. With this digital revolution, the boundaries between the physical and digital worlds are blurring, giving life to an interconnected 4.0 factory in which people, machines, and products interact.
Classic Value Stream Mapping (VSM) has found application in various processes in different sectors over the last few decades, allowing the process to be analyzed to identify the bottlenecks to its performance. But using classic VSM there is no power to take advantage of the promising new opportunities of digitization and Industry 4.0 to integrate information flows, reduce lead times and improve flexibility.
However, the current trend towards digitization of processes requires greater depth and level of detail in the description of information flows, which converges with the idea of digital VSM 4.0, which allows for more transparent decisions and suggestions for improvements that are more relevant to production systems. In addition to its clarity and relative simplicity, its strength lies in its ability to capture the main material and information flow in production processes.
Using the VSM 4.0 application, it is now possible to perform value flow analysis, create a value flow design digitally, and access it from anywhere, horizontally, and transparently. This makes information silos a thing of the past.
The System Engineering approach adopted for their modeling must make it possible to manage all the tasks necessary for the development of the system, from the determination of the functional architecture to be carried out, to the validation of the choices made. As a result, we consider in this research the model-based System Engineering methods as the best engineering alternative for the development of complex systems. This is why we focus on the SysML (Systems Modeling Language Language) and the AutomationML (AML) profile.
We have used the SysML language for various reasons, initially, in a complex system such as Smart VSM, the material and information flows exchanged between components and blocks do not permit to describe a system only in the text format, therefore the use of a graphic medium becomes crucial. Also, the presence of hierarchical layers often requires an assembly of graphical representations, while a SysML model offers more operable information than other types, with information about structures and dynamics, so there are more possibilities to achieve exploitation of VSM 4.0.
Using AutomationML as a solution for data exchange, all engineering information will be stored according to an object-oriented paradigm and provides for the materi-

al and logical modeling of components, such as data objects encapsulating different aspects. Objects can form a hierarchy, which means that an object can be composed of a set of sub-objects and can itself be part of a larger composition or aggregation. Besides, each object can contain information about the object by describing the properties that cover it (Nicole Schmidt, Arndt Lüder, 2015).

In our research work we aim to propose a conceptual model for the implementation of Smart VSM .

The rest of the paper is organized as follows: Section II presents the VSM4.0 methodology as a digital tool to the intelligent factory, specifying its properties and benefits. A SysML model of the system that allows for understandable exploitation for all participants is provided in Section III. Section IV deals with the data exchange language: AutomationML (AML) which is designed as data exchange between the automation tools in our chain. Section V concludes the paper.

2 LITERATURE REVIEW

Value Stream Mapping is a visual analysis tool that enables a visual and group inventory to identify all the activities produced, those with added value (VA) and those with non added value (NVA), necessary for production. The final objective of this tool is the elimination of wastage with ensuring a continuous flow of products. (Mike Rother and John Shook, 1999).

However, despite the incontestable contribution of the use of classical VSM in the implementation of a Lean Manufacturing approach, several research studies have demonstrated the limited application in different business processes in different sectors over the last decades (Herron and Braiden, 2006), there are various gaps and challenges in the development, analysis and application of vsm.

VSM is a representation of the system with all flows in the current state, it is a static paper-based mapping with data retrievable by field observation and manual integration in order to trace the value chain, to record all stocks and processes(Grewal, 2008), this makes it incompatible with the dynamic processes when new production orders arrive and therefore a change of data which requires manual recalculation of VSM. Consequently, it should be equipped with a high degree of responsiveness and flexibility that will allow the system to manage more data variance in order to increase its efficiency.

As a result, classical VSM does not permit the mapping and identification of the non-value-added activities of a dynamic system which is characterised by its constant evolution, it's uncertainty principle which does not correspond to the Lean Manufacturing methodology based on consistent standardisation, and its structural volatility.

As well as the detection, validation and prioritisation of problematic or poor value-added tasks are time-consuming activities (Stadnicka and Litwin, 2019) .

It can be concluded that classical VSM is a manual, tedious and time-consuming method, with a lack of flexibility and reactivity and unable to support dynamic aspect systems.

However, with the Digital Manufacturing revolution, new technologies are an opportunity to be seized to meet the challenges of the times with industrial constraints that force manufacturing companies to be more flexible and quicker and to innovate through new digital tools that allow the creation of added value. LM's basic tools necessary for the successful implementation of Industry 4.0 are value chain mapping, Kanban and SMED standardisation. They mainly concern ERP implementation, modularity and interoperability, plug&play solutions, batch size reduction and data management(Ghobakhloo and Fathi, 2019) .

In order to overcome the above-mentioned challenges, this article focuses on the combination of digital technologies such as Virtual simulation, Automation, Internet of things (IoT), Big Data (BD) with VSM, which has led to the birth of Value Stream Mapping based on the Industry 4.0 approach (VSM 4.0).

This subject has not yet been the object of much research, only a few publications have been published recently (Hartmann et al., 2018) (Meudt et al., 2017). This gap in terms of scientific research is linked to the fact that the methodology is still recent. However, it seems interesting to us to examine this new type of research which could open up new avenues with interesting results.

The new VSM 4.0 method, also known as Smart Value Stream Mapping, is a digital and collaborative work environment for lean management teams in the era of Industry 4.0 and offers manufacturing companies an enormous added value for plant planning and optimisation of the production process by digitising value, so it can enable improvements and more transparent decisions.

According to(Meudt et al., 2017), the process of implementing VSM 4.0 follows six steps, which are represented below:

Step 1: Conducting conventional value chain mapping.

Step 2: the listing of all types of data storage and indicators.

Step 3: the collection of data and indicators by the process according to frequency, type of collection and current value.

Step 4: The classification of the collected data and indicators.

Step 5: After the subjective description of wastage, a detailed view of the connection and linkage between processes.

Step 6: The listing of possible improvements in each process that can eventually be implemented.

With Value Stream Mapping 4.0, all product and information flow in a value chain are analysed and signed. It comprises Value Stream Analysis 4.0 (VSA 4.0) and Value Stream Design 4.0 (VSD 4.0).

The application of VSA 4.0 allows detailed observation of the information flow, it targets the waste generated during the processing and application of the data.

VSD 4.0 is used to determine the future state of the process, which focuses on the integration of the necessary

material and information flows and the development of consistent implementation in IT systems.
The objective of the method is that the type of data collected, the processing of the information, the storage medium, the key performance indicators (KPIs) and the use of the collected information can be visually represented. In addition to material flow, the information flow of a value chain can also be collected, visualised and analysed with VSM 4.0. It can therefore be concluded that the integration of digital technologies with VSM makes VSM easy, fast and more flexible. In the context of Industry 4.0, VSM will be able to manage dynamic aspect systems and quickly detect problematic tasks and NVA activities in production processes.
The research work is in the area of systems engineering so that the realisation of innovative systems requires the use of a process capable of piloting the project, from the expression of needs to the deployment of the system. This type of process is called a systems engineering (SE) process. It indicates a sequence of functions to be carried out, requiring the usage of methods often supported by tools.

3 SYSTEM ARCHITECTURE MODELING USING SYSML

The realization of an innovative system requires the adoption of a process capable of piloting the project, from the expression of needs to the deployment of the system.
This type of process is referred to as a System Engineering (SI) process, which allows the analysis of the different facets of a system: its functions, structure, and comportment (Gero and Kannengiesser, 2004). It indicates a sequence of tasks to be realized, requiring the employment of methods supported by tools.

3.1 Use cases Diagram

To express the scope of the VSM 4.0 project, it is natural to start by defining the boundaries of the study. To do this, we define the use cases of the developed system (figure 1). A use case (UC) represents a number of sequences of actions that are carried out by the system and that produce an observable result for a particular actor. Each use case specifies a behaviour expected from the system considered as a whole, without imposing the mode of realisation of this behaviour. It allows describing what the future system will have to do, without specifying how it will do it (Hartmann et al., 2018).

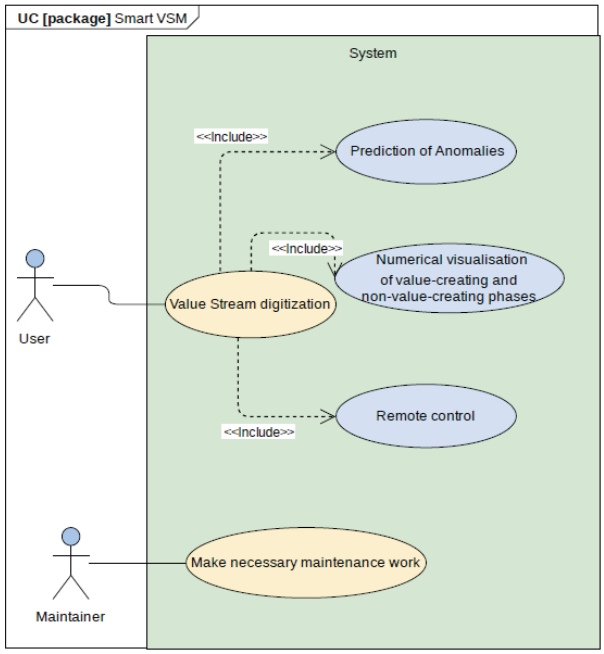


Figure 1: Use Case Diagram of the Smart VSM

3.2 Requirement Diagram

The requirement diagram is used to structure the needs expressed by all the partners during the various successive specifications. The Requirements Diagram (RD) gives the possibility to organize the requirements in a precise way and allow them to decompose each one of them, to obtain simple requests, which can be assigned and linked to targeted elements of the diagram.
A pole of requirements for the quantitative data analysis process was identified. The RD was organized into three requirements representing each of these themes (figure 2).
These are decomposed into more specific requirements expressing for most quantified requirements. The transparency of material and information flows can be created by identifying all non-value added processes and their causes, thus eliminating sources of waste. The representation also indicates the principal components which allow specifying the different types of data storage that will provide, in real-time, the right information to the right person at the right time.

A second requirement groups the requirements that relate to the analysis of data with a view to quality. The Smart VSM must include the complete and accurate analysis of the spectrum of existing material and information flows, the identification of improvements to be made, and the subsequent optimization in terms of lean production. with regular use, a continuous improvement loop will appear.

The third phase of the requirements diagram of the new VSM methodology based on industry 4.0 is the description of the solutions and enhancements offered by the latter. The Smart VSM should enable us to capture and model value chains, and access them from anywhere,

horizontally and transparently to ensure that the present state of value streams will be recorded quickly and easily through the implementation of touch screens and mobile touch devices on the shop floor that will bring responsiveness, which will take us towards visual management. The navigation within the SysML requirements diagram can also be oriented to focus attention on the total flexibility of the mapping through the use of paperless modeling (easy and fast data exchange).

same level by an association, or of different levels by a composition. It can also show the main characteristics of each block by showing its operations and properties. In this sub-section, we present a hierarchical structure constituting a standard called "Computer Integrated Manufacturing" (CIM) (Sanjay B. Joshi and Jeffrey S. Smith, 2013), implementing the BDD diagram. In such a structure, our works are located in the real-time levels of the CIM, and thus in particular in the data exchange between the different layers of the CIM pyramid. In order to de-

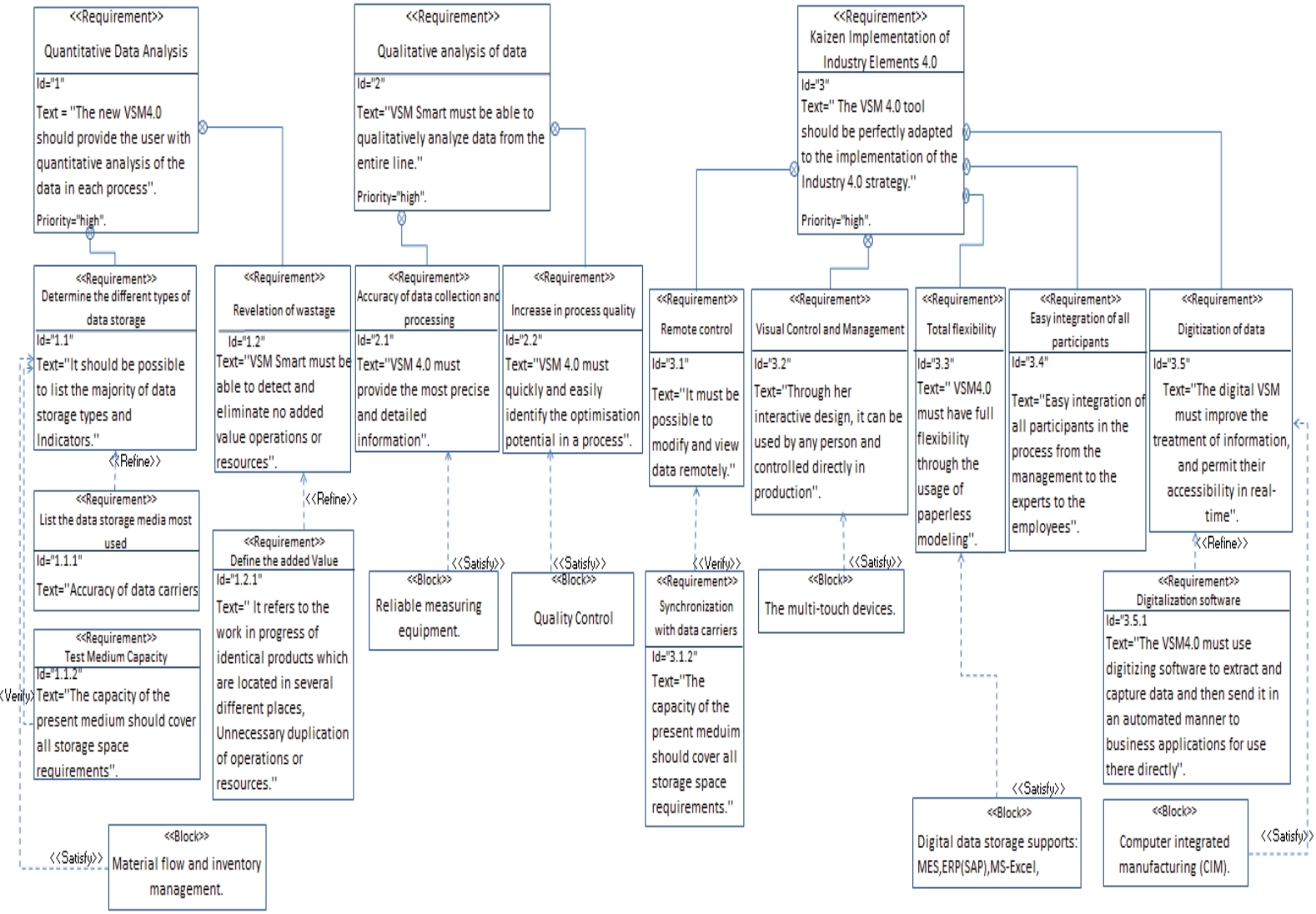


Figure 2: SysML Requirements Diagram of the Smart VSM

3.3 Block Definition Diagram

To define the logical architecture of the system and to have a hierarchical view of the components grouped within the functional entities (the subsystems), it is necessary to use the Block Definition Diagram (BDD). It describes all the structures of the modeled system: logical, material, functional.
It allows to visualize the structure of the system at a glance by representing the links between blocks of the

fine our block definition diagram (figure 3), we propose to go into the details of the processing and exchange of process data, focusing on the source, format, and granularity of the information, with which our VSM 4.0 methodology will interface.

- **Block: Management of material flows and inventories**

- Reception of raw materials or components:

The reception of raw materials is the first stage of production, which is taken into account by the ERP or by the production follow-up (MES) or jointly.

- Inventory of stocks and work in process :

All companies that have stocks and work in progress must make an inventory of them. Inventory management is a key factor for many manufacturers. With the ERP software, it is possible to control multi-deposit stock levels, by location, by index, by packaging or by logistics unit in modes: FIFO, LIFO.

- Batch tracking:

Batch tracking in an ERP system is useful or even mandatory, it allows to identify each component of a product and to follow its trajectory.

- **Block: Planning and Scheduling**

The planning and scheduling of tasks and activities are part of the basis for good business performance. In our case, we are talking about the planning of production orders that are to be transmitted by the ERP system, which is equipped with an operating interface for the task planning, allowing to follow all the production orders in production or planned, or CAM (Computer-Aided Manufacturing) to the MES software.

- **Block: Production order management**

A production order (PO) defines the products to be produced and the resources required for production.
They are usually objects of exchange between the ERP and the MES production monitoring. The POs are generally prepared in the ERP (or CAM) from the orders and transferred to the MES production monitoring, but some manufacturers prefer the direct creation of POs in the MES. In fact, the direct creation of the POs in the MES provides a backup mode in case of ERP maintenance.

- **Block: Quality control**

Quality, an essential component of production monitoring, is a transversal function that operates from the reception of raw materials to the delivery of products.

- Quality controls in reception:

At reception, one or more checks are carried out at the end of which the batch of raw materials or components will be accepted or rejected. These controls can be manual or automatic (the data are then acquired directly from the equipment). The parameters of these controls are traced on ERP.

- Quality rate and performance:

In terms of performance, production losses due to non-quality obviously play a crucial role. The quality rate is one of the three components of the OEE (Overall Equipment Effectiveness) which measures the productivity of a production line. It is calculated automatically based on the measurement (automatically and/or by input) of rejected products at the different stages of manufacturing.
Through the execution system, managing and monitoring the production in progress in the workshop, the operator is immediately alerted of a malfunction and is able to put in place the necessary rectifications. Finally, a number of activities will lead ERP and MES to cooperate, such as scheduling, quality and maintenance.

- **Block: Industrial Processes**

- Production performance:

In order to optimize industrial processes, it is necessary to collect the information, either manually or automatically, to process and consolidate it in a structured database form.
Whether by calculating and monitoring the OEE (Overall Equipment Effectiveness), the MTBF (Mean Time Between Failures), the MTTR (Mean Time To Repair), the results of these processes are translated into production performance indicators (Key Performance Indicators) or reports. The indicators, states and balances obtained are disseminated to all operators and managers in an appropriate form.

- Display of graphs in real time :

The dissemination and analysis of production information, also called EMI (Enterprise Manufacturing Intelligence) is an essential link in the monitoring of your manufacturing. The module's EMI functions benefit from all the ease of use and power of Microsoft Excel to create your real-time graphs and reports. Longer reports are edited in PDF format with chapters and sections.

- **Block: Measurement, recording and data transmission**

The recorders support the automatic recording of measurements or data in event mode, thus saving storage space. Periodic forcing is still possible.
Periodic archiving, setting the data retention time 'online', is also managed, all this with the industrial supervision (SCADA system) and the control command of the installations which are an essential component of the control of your production, and to ensure the communication with the automatons and equipment, which offers to the operators an optimal driving ergonomics.

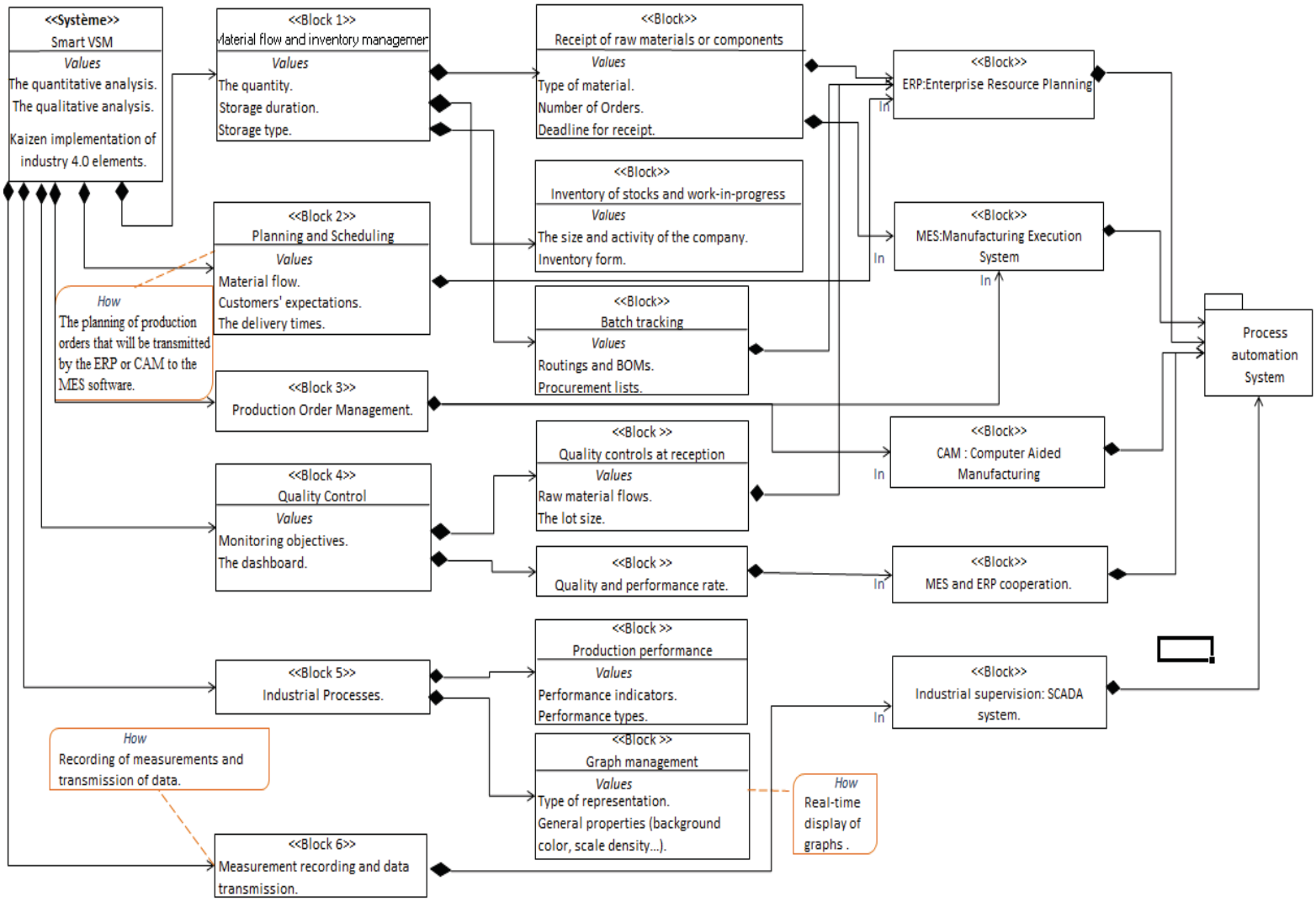


Figure 3: SysML Block Definition Diagram (BDD) of the Smart VSM

4 AUTOMATIONML MODELING

Production system engineering is generally characterized by strong phase separation and a variety of specialized engineering tools for each phase. This poses the problem of a wide range of heterogeneous tools, with individual and often proprietary data formats and insufficient data exchange support. Hence, data exchange between engineering tools has been identified as a major bottleneck in the engineering workflow. Therefore, AutomationML (AML) (Estefan, 2008) aims to fill this gap by facilitating the exchange of various aspects of automation engineering and its ability to handle multiple semantics in a heterogeneous engineering tool landscape. This section provides an overview of the correspondence between AML and SysML, as well as the modelling in AML.

4.1 AML profile design for SysML (AML4 SysML)

An AML profile can extend an existing modeling language (SysML) by adding new concepts or by specializing concepts defined by it. We present an interdisciplinary integration chain for AML and SysML based on interoperability techniques driven by AML/SysML profiling and model transformation models (Berardinelli et al., 2016).

4.2 Between AML and SysML

The proposed correspondence between AML and SysML is intended to promote cross-fertilization between these two standards and their communities. As a result of the resulting mapping, the AML community can, on the one hand, benefit from the graphical representation provided by SysML diagrams, based on model-based techniques and tools for SysML and UML. On the other hand, the SysML community can use many AML libraries to model production systems, such as those defined by the AML standard, to mention only a few cross-fertilization possibilities.

4.3 AML modeling of VSM 4.0

An AutomationML (AML) modeling of the new VSM methodology in the industry 4.0 eras, which was discussed earlier in our manuscript, is presented in figure 4. Note that AML does not provide a standard concrete notation as does the SysML language. Therefore, we provide holistic modeling following the architecture of AutomationML in the form of a graphically oriented diagram. The legend under the schematic representation of the Smart VSM explains this notation with AML concepts.

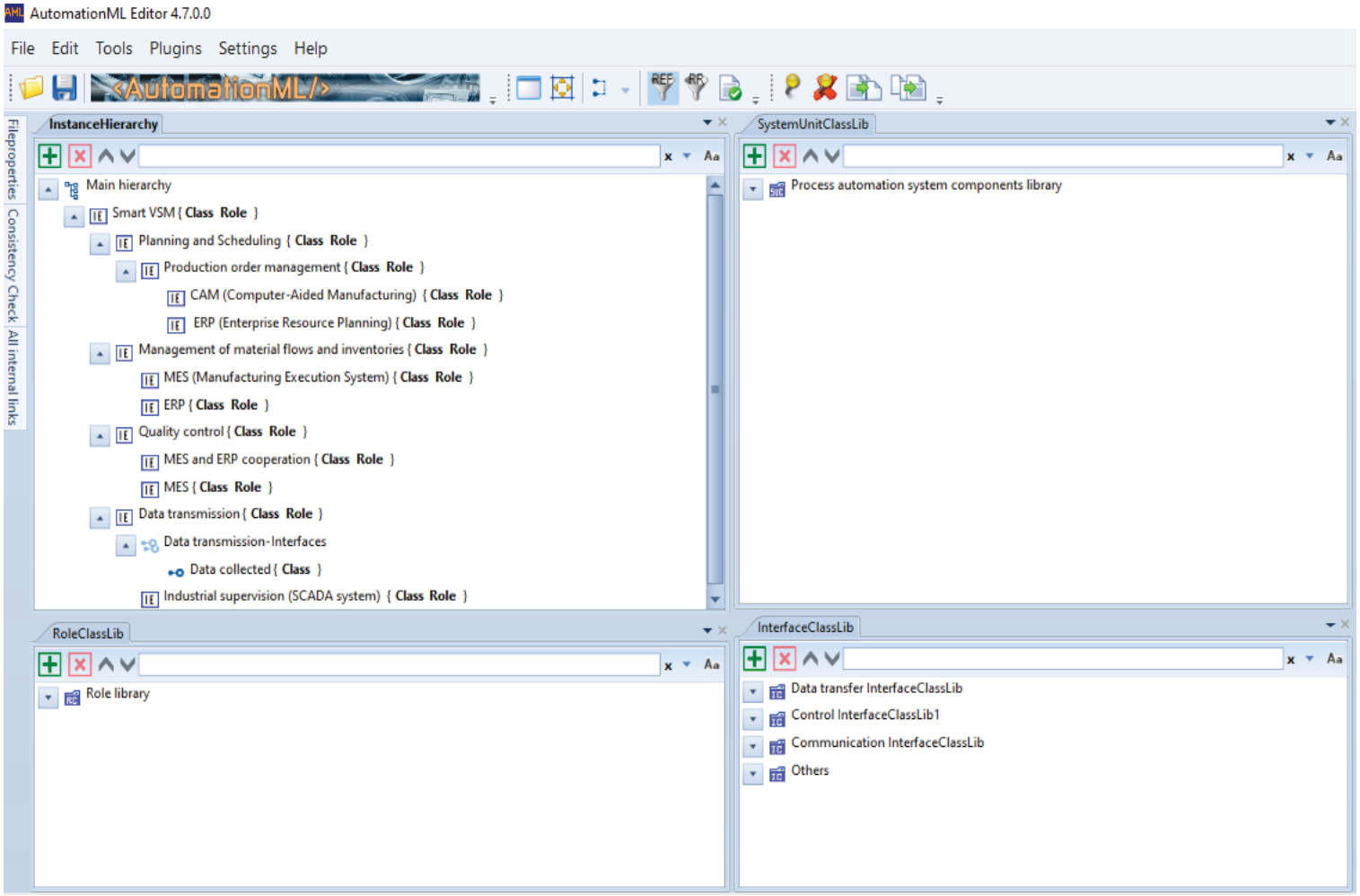


Figure 4: The mapping of the Smart VSM with the AutomationML model

SysML blocks can be modeled in the form of the instance hierarchy and 3 library hierarchies, which allows modeling the diagram of the SysML block definition and the internal block diagrams in the form of modular component trees representing the element specification (Berardinelli and al., 2017). Its content can now be edited and displayed on AML-specific diagrams. In particular, Fig.4 shows the Smart VSM instance hierarchy on an Instance Hierarchy Diagram (IHD) corresponding to the SysML BDD shown in figure 3.

4.4 Smart VSM with AutomationML Editor

AutomationML supports four types of hierarchy, as illustrated in figure 4 with Automation Editor, the box on the upper left allows us to model individual objects hierarchically, both as physical elements and as virtual information as Internal Elements (IE). We will now focus on the other three windows of the main hierarchy, Interface ClassLib which contains a number of abstract interface classes such as Data transfer Interface ClassLib and control Interface ClassLib, which are used in the VSM 4.0 project, then Role ClassLib contains a Role Class, and then System Unit ClassLib, which deals with process automation system components.

5 CONCLUSION

When we began our work, our ambition was to help business leaders, mainly SMEs, to become aware of the importance of the on-going industrial revolution. We wanted to guide them in managing the digital value chain with the aim of improving industrial performance. Today, companies in all sectors of activity are facing increased competition. The willingness to transform digitally is today decisive for the success and failure of a company. To achieve its objectives, the company must adapt or develop solutions with high added value. The management of the digital value chain of manufacturing companies in the context of industry 4.0, in particular, is

increasingly becoming a distinguishing factor within the competition.

Value Stream Mapping 4.0 (VSM 4.0) is a digital and collaborative work environment for lean management teams in the Industry 4.0 era that helps us optimize the production process by digitizing the value stream. The idea focuses on higher levels of digitization, integration, and automation of information and material flows for a plant and beyond, which can enable more transparent decisions and improvements to production systems.

REFERENCES

Alasdair Gilchrist, 2016. Industry 4.0 *The Industrial Internet of Things*. Apress, Berkeley, CA.

Berardinelli, L., Biffl, S., Lüder, A., Mätzler, E., Mayerhofer, T., Wimmer, M., Wolny, S., 2016. Cross-disciplinary engineering with AutomationML and SysML. at - *Automatisierungstechnik* 64.

Berardinelli, L., Mazak, A., Alt, O., Wimmer, M., Kappel, G., 2017. Model-Driven Systems Engineering: Principles and Application in the CPPS Domain, in: Biffl, S., Lüder, A., Gerhard, D. (Eds.), Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. *Springer International Publishing*, Cham, pp. 261–299. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56345-9_11

Estefan, J.A., 2008. *Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies* 70.

Gero, J.S., Kannengiesser, U., 2004. *The situated function–behaviour–structure framework*. Design Studies 25, 373–391.

Ghobakhloo, M., Fathi, M., 2019. Corporate survival in Industry 4.0 era: the enabling role of lean-digitized manufacturing. *JMTM* 31, 1–30. https://doi.org/10.1108/JMTM-11-2018-0417

Grewal, C., 2008. An initiative to implement lean manufacturing using value stream mapping in a small company. *IJMTM* 15, 404. https://doi.org/10.1504/IJMTM.2008.020176

Hartmann, L., Meudt, T., Seifermann, S., Metternich, J., 2018. Value stream method 4.0: holistic method to analyse and design value streams in the digital age. *Procedia CIRP* 78, 249–254. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.309

Herron, C., Braiden, P.M., 2006. A methodology for developing sustainable quantifiable productivity improvement in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics* 104, 143–153.

Meudt, T., Metternich, J., Abele, E., 2017. Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production. *CIRP Annals* 66, 413–416. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.005

Mike Rother, John Shook, 1999. Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate MUDA. Productivity Press.

Nicole Schmidt, Arndt Lüder, 2015. *AutomationML in a Nutshell* 47.

Sanjay B. Joshi, Jeffrey S. Smith, 2013. Computer control of flexible manufacturing systems research and development. *Springer*, Springer Netherlands.

Stadnicka, D., Litwin, P., 2019. Value stream mapping and system dynamics integration for manufacturing line modelling and analysis. *International Journal of Production Economics* 208, 400–411. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.12.011

13the International Conference on Modeling, Optimization, and Simulation - MOSIM'20 – November 12-14, 2020- Agadir – Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries."

SPARE PARTS INVENTORY CONTROL BASED ADDITIVE MANUFACTURING

Youssef Abidar

Department of Systems Engineering
École de Technologie supérieure
Montreal, Canada, H3C 1K3
youssef.abidar.1@ens.etsmtl.ca

Amin Chaabane

Department of Systems Engineering
École de Technologie supérieure
Montreal, Canada, H3C 1K3
amin.chaabane@etsmtl.ca

ABSTRACT: *Spare parts inventory control represents a challenge for every aerospace company. Determine the optimal allocation consumption of spare parts is problematic due to the intermittent Demand. To avoid any financial loss, the original equipment manufacturer (OEM) uses different inventory models to evaluate the stock level to avoid the non-availability of the desired spare parts when required. The models developed do not consider the recent evolution and adoption of industry 4.0 technologies such as additive manufacturing (AM). This paper aims to evaluate the advantage of the AM integration for spare parts inventory optimization.*

Furthermore, it compares three scenarios for spare parts allocation, taking into consideration the AM process. This goal has been realized by scenarios modeling for spare parts in a multi-echelon system. The first scenario considers no integration of AM. The second scenario considers the integration of the AM in the central maintenance center (CMC) only. The third scenario considers AM's integration in CMC and in the regional maintenance center (RMC). The results of this study show that decentralized AM is the best and optimal scenario for the allocation of spare parts in multi-echelon systems. Besides, an optimal stock level exists where the conventional process stays the optimal allocation for spare parts.

KEYWORDS: *Spare parts, inventory model, aerospace, additive manufacturing, multi-echelon.*

1 INTRODUCTION

An aircraft consists of a large number of components and single parts. The components may consist of different sub-assemblies containing multiple parts that may need replacement. Only the inspection determines which parts need to be replaced or repaired. The spare parts availability, when required, is crucial for an original equipment manufacturer (OEM). Providing the appropriate spare part at the right time and in the right place represents a big challenge for the aerospace companies. The non-availability of the desired spare parts leads to financial loss impacting the company's performance. The spare parts inventory control is a key driver for the operational efficiency of an airline. Spare part management is time-consuming and causes costly difficulties for service spare parts providers and customers. Maintaining inventories of infrequently ordered parts is expensive. In the airline industry, determining the spare parts consumption is a complex process mainly due to the intermittent Demand. The Demand for spare parts arises whenever a component fails or requires replacement. Its patterns are often intermittent, variable in size, and interspersed by periods due to demand forecasting, such demand patterns are known as "lumpy" (Martin, H., 2010). To avoid parts shortage, the maintenance department has to keep an extensive spare parts safety stocks due to the unpredictability of spare parts demand. A fundamental process of an aircraft's inventory management is to forecast spare parts and ensure parts availability to avoid any delay.

For instance, spare parts engine in the commercial aviation industry is valued at $30 billion (Cohen et al., 2006). More generally, after-sales services and spare parts are estimated at $1 trillion in the United States every year, representing 8% of its gross domestic product (Cohen et al., 2006). As per the aviation week (2011), component repairs (non-military) generated a turnover of $9 billion in maintenance, repair & overhaul (MRO) business. As per the aviation Week and Space Technology (2013), the MRO expenditures are estimated to be U.S. $50 billion in 2013. The MRO spent constitutes 12-15% of an airline's operating cost (IATA, 2009).

For the spare parts inventory management model, researchers' focus is more on analytical models and simulation. These models lack the integration of new emerging technologies in industry 4.0, such as additive manufacturing, which could be an alternative manufacturing process to avoid spare parts shortages. This research's primary motivation is to define the best scenarios of AM integration for spare parts inventory management. In other words, this study demonstrates the optimal solution for AM integration for a multi-echelon system. This paper aims to evaluate the potential of the additive manufacturing integration for spare parts inventory optimization. The

specific objective is to answer the following research questions:

- [QR1]: What is the best configuration in a multi-echelon system for spare parts inventory management to integrate additive manufacturing in the aerospace industry?
- [QR2]: To which stock level does the integration of additive manufacturing provide an optimal stock allocation of spare parts inventory in the aerospace industry?

The rest of the article is organized as follows. The background of this study is introduced in the following section. The literature review is presented in section 3. The research methodology is detailed in section 4. Section 5 gives the details of the results. Result discussion and conclusion are presented in section 6.

2 BACKGROUND

2.1 Additive manufacturing and spare parts management in a supply chain

The emergence of AM technology has created another dynamic for improving supply chain performance. Indeed, it has made it possible to reduce the lead-time, waste raw material, manufacture parts near the customers, and reduce inventory (Liu et al., 2014). According to the latest report from the Direct Manufacturing Research Center (DMRC), the supply chain has been identified as the AM's future. The use of AM to produce spare parts could be considered a solution to improve efficiency and increase customer value (Mashhadi et al., 2015). This leads to a new reconfiguration of a supply chain (Khajavi et al., 2014). The AM has the potential to significantly improve supply chain dynamics, reduce delivery costs, reduce inventory levels, and reduce delivery time. In aeronautics, several companies are interested in integrating this technology into their parts manufacturing processes.

Several studies have dealt with the introduction of AM in aeronautics to produce spare parts (Holmström et al., 2010). However, a limited number of parts have been manufactured from the AM in an economical way. Holmström et al. (2010) proposed two approaches to integrating AM into spare parts manufacturing in an aerospace supply chain. The first approach is the centralization of the AM to replace the stock for maintenance. To do this, AM machines should be deployed in distribution centers to provide spare parts to the customer. Its advantage is the centralization of Demand from different regions in one place. However, there must be a delay related to the delivery time, which represents a disadvantage. The second approach is the decentralization of AM in each service point. This approach is advantageous when the volume of production is high but requires the justification of the investment. It allows the elimination of the stock, reduce transportation costs and fast delivery time. In sum, by opting for AM technology, production's centralization represents the optimal configuration for a supply chain (Liu et al., 2014). It allows a reduction of capital as well as a short production cycle for spare parts. Moreover, according to Dornfeld (Kaebernick, 2014), the AM would impact a five-level, such as product design, tool design, production line design, factories design, and supply chain configuration.

In this study, we follow the Holmström et al. (2010) stream by developing a mathematical model for the multi-echelon technique for the recoverable item control (METRIC) system developed by Sherbrooke (1968) by integrating the AM.

3 LITTERATURE REVIEW

3.1 Multi-echelon inventory management

The study of multi-echelon inventory systems was originated by the work of Clark and Scarf (1960). The authors showed that an echelon-based stock policy is optimal for a "pure" serial inventory system. As a result, the fixed order cost is charged only at the highest echelon. Feeney and Sherbrooke (1996) extend Scarf's results for multi-echelon systems by applying Palm's theorem and demonstrate that if the demand process is Poisson, then the distribution of outstanding orders is also following Poisson process. This result leads to the Research and Development Corporation (RAND) to develop the Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control (METRIC) model for the U.S. Air Force (Sherbrooke, 1968). The METRIC model represents a successful implementation of a multi-echelon repairable parts system. The model permits the determination of the optimal stocking level for the upper and downstream echelon by minimizing the expected number of backorders subject to a system budget constraint.

Multi-echelon inventory management is based on an inventory optimization across the network to minimize the stocks (echelons) cost function subject to the constraints on the customer service level. As a result, with effective multi-echelon inventory management, the inventory level will decrease by 15%-25%" (Ellis et al., 2009). Effective multi-echelon inventory management counts on information and computer technology, and the multi-echelon inventory model developed to optimize inventory planning and management throughout the whole network.

3.2 Multi-echelon inventory system and spare parts flow

A multi-echelon inventory system characterized by two or more levels of warehouses, e.g., in a two-echelon system for MRO business, the lower–echelon may contain RMC that service the customer, while the upper–echelon, or CMC, resupplies the lower echelon and make the major reparation that does not exist in the regional warehouse.

The multi-echelon structure corresponding to the application of the spare parts flow in MRO for an aerospace company. The multi-echelon system may reduce total inventory costs by as much as 50% (Muckstadt and Thomas, 1980). For example, in the MRO business, multiple central and regional maintenance centers are usually modeled as a multi-echelon inventory system. The inventory is managed with multiple stocks in different echelons or levels, where the "echelon" of stock refers to the position (level). A multi-echelon inventory system is depicted in Figure 2.

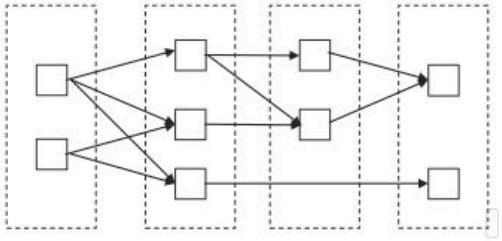


Figure 2: A multi-echelon inventory system

The multi-echelon system is considered a network where all the stakeholders, such as customers, suppliers, supply chain, warehouse, and maintenance centers, are interconnected. This makes the multi-echelon inventory system more complicated due to the number of suppliers and the customers that this network may have. Different structures exist in the multi-echelon inventory systems, which can be categorized into serial systems, assembly systems, distribution systems, and general systems (Zipkin, 2000). The serial structure is characterized by having only a single stock in each echelon. The assembly systems are more for parts assembly in which we may have multiple components and subassembly. The distribution systems are focusing on product distribution to the customers

4 METHODOLOGY

The methodology of this research is scenario modeling. The scenario model investigates the use of additive manufacturing to produce functional spare parts. To evaluate a METRIC system for the integration of additive manufacturing, we elaborate on three scenarios. The first scenario (model 1: Baseline) where is no AM integrated. The second scenario (model 2) with centralized AM. The third scenario (model 3) is with decentralized AM. The scenarios are summarized in Figure 3.

Scenario 1 (model 1) No additive manufacturing integration (baseline)	
Scenario 2 (model 2) Additive manufacturing integration in CMC only	Scenario 3 (model 3) Additive manufacturing integration in CMC and RMC

Figure 3: Scenarios configuration

5 MATHEMATICAL FORMULATION

5.1 Notation

i Item number, $i = 1,2$

j Site number, $j = 0,1,2$, $j = 0$ represent CMC

λ Mean demand rate

υ Meantime to repair

γ Meantime to repair AM

ρ Repair probability

ϕ AM repair probability

τ Meantime between shipment and receipt for repair parts

α Meantime between shipment and receipt for AM parts

μ Mean number of parts under repair or resupply (pipeline)

S_{ij} Stock level for parts for the item i at the site. $S_{ij} = 0,1,2,3....$

EBO_{ij}^{AM} Expected Backorder for the AM parts for the item i at the site j

EBO_{ij}^{RP} Expected Backorder for the repair parts for the item i at the site j

EBO_{ij} Expected Backorder for the whole system for the item i at the site j

5.2 Assumptions

The METRIC theory calculates for every item on a system the optimal stock level at each of several bases, which may differ in terms of item demand rates. The objective function is the sum of Backorders across all bases. Thus, the fact that minimizing the base Backorders is equivalent to the maximization of availability of an aircraft.

The principal METRIC model assumptions are:

- The decision as to whether a base repair an item does not depend on stock levels or workload.
- The estimated Demand is stationary.
- The parts that are not repairable at the downstream level will be repairable at the upstream level.
- The upstream echelon has high repair capacities relative to the low demand requirements for repairable parts.
- The base is resupplied from the depot, not by lateral supply from another base.
- The (s - 1, s) inventory policy is appropriate for every item at every echelon.

5.3 Model 1

In this scenario, the RMC can not make all kinds of reparation, but the CMC has more capacity and is more equipped to make all reparation coming from the field. The spare parts reparation is done by the conventional manufacturing process (CP) (Figure 4).

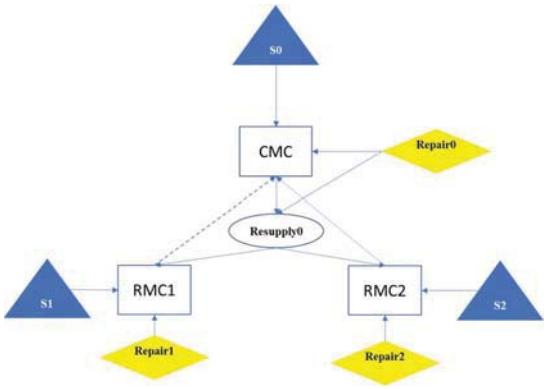


Figure 4: Scenario 1 without AM integration

Total Expected Backorder at the depot

First, we must calculate the average Demand that is repairable at the CMC and the fraction of Demand that is not repairable at each base. Thus, the total main Demand at the CMC (Sherbrooke, 1992) is as follows:

$$\lambda_{i0}^{*} = \lambda_{i0}\rho_{i0} + \sum_{j=1}^{2}\lambda_{ij}\left(1-\rho_{ij}\right) \tag{1}$$

The number of parts under repair or resupply that is repairable at the CMC equals:

$$\mu_{i0}^{RP} = \nu_{i0}\left(\lambda_{i0}\rho_{i0} + \sum_{j=1}^{2}\lambda_{ij}\left(1-\rho_{ij}\right)\right) \tag{2}$$

The total Expected Backorder for the depot (Sherbrooke, 1992) equals:

$$\mathrm{EBO}_{i0}^{\mathrm{RP}}\left(s_{i0}\right) = \mu_{i0}^{\mathrm{RP}}\frac{\left(\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}\right)^{s_{i0}}}{s_{i0}!}e^{-\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}} + \left(\mu_{i0}^{\mathrm{RP}} - s_{i0}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{i0}}\frac{\left(\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}\right)^{l}}{l!}e^{-\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}}\right) \tag{3}$$

Total Expected Backorder for each base

The average total Demand that is repairable at the base equals the average Demand repairable at the base, plus the demand resupply from the CMC. We are assuming that the Demand is given by a Poisson process, and using the fact that a sum of Poisson processes is a Poisson process (Sherbrooke, 1992). Thus, the Fraction demand that is repairable at each base is expressed as follow:

$$\lambda_{ij}^{*} = \lambda_{ij}\rho_{ij} + \lambda_{ij}\left(1-\rho_{ij}\right) \tag{4}$$

Thus, the number of parts under repair or resupply that is repairable at the CMC equals:

$$\mu_{ij}^{\mathrm{RP}} = \lambda_{ij}\left(\rho_{ij}\nu_{ij}\right) + \left(1-\rho_{ij}\right)\left(\tau_{ij} + \frac{\mathrm{EBO}_{i0}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\lambda_{i0}^{*}}\right) \tag{5}$$

Th $EBO_{i0}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)$is is the expected number of resupply outstanding at the depot at a random point. The quantity $\frac{EBO_{i0}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\lambda_{i0}^{*}}$ represents the average delay added daily to resupply requests, resulting from the fact that the depot does not always have stock on the shelf. τ_{ij}represents the order-and-ship time from the CMC to the RMC. Thus, the expected Backorder at the base equals:

$$\mathrm{EBO}_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}\left(s_{ij}\right) = \mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}\frac{\left(\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}\right)^{s_{ij}}}{s_{ij}!}e^{-\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}} + \left(\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}} - s_{ij}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{ij}}\frac{\left(\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}\right)_{ij}^{l}}{l!}e^{-\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}}\right) \tag{6}$$

5.4 Model 2

In this scenario, we propose the integration of the additive manufacturing centralized in the CMC. Thus, the CMC will supply the RMC with repairable parts and additive manufacturing parts (Figure 5).

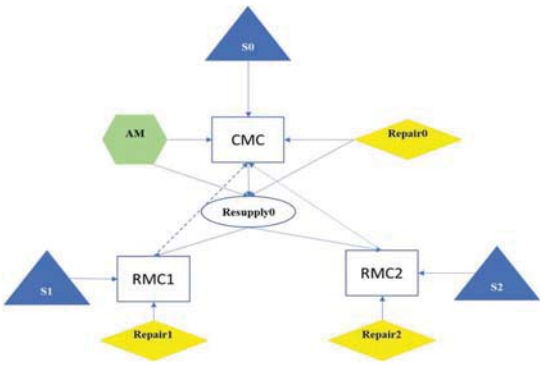


Figure 5: Scenario 2 with centralized AM integration

Total Expected Backorder for the depot

First, we must calculate the average Demand repairable at CMC plus the fraction of the average Demand not repairable from the RMC. Since we integrate the AM at CMC,

let ϕ be the probability that the parts will be done by AM and $(1-\phi)$the probability that the CP will repair the parts. Thus, the average Demand for repairable equals:

$$\lambda_{i0}^{*}=\left(\lambda_{i0}\rho_{i0}+\sum_{j=1}^{2}\lambda_{ij}\left(1-\rho_{ij}\right)\right)\left(1-\phi_{i0}\right) \tag{7}$$

The average Demand repairable with AM equals:

$$\omega_{i0}=\phi_{i0}\left(\lambda_{i0}\rho_{i0}+\sum_{j=1}^{2}\lambda_{ij}\left(1-\rho_{ij}\right)\right) \tag{8}$$

Let γ be the meantime to repair the parts that will be done by AM. Thus, the number of parts under repair and AM that are repairable at the CMC equals:

For repair: $$\mu_{i0}^{RP}=\nu_{i0}\lambda_{i0}^{*} \tag{9}$$

For AM: $$\mu_{i0}^{AM}=\gamma_{i0}\omega_{i0} \tag{10}$$

$$\mu_{i0}=\nu_{i0}\lambda_{i0}^{*}+\gamma_{i0}\omega_{i0} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}\mu_{i0}=\nu_{i0}&\left(\lambda_{i0}\rho_{i0}+\sum_{j=1}^{2}\lambda_{ij}\left(1-\rho_{ij}\right)\right)\left(1-\varphi_{i0}\right)\\&+\gamma_{i0}\varphi_{i0}\left(\lambda_{i0}\rho_{i0}+\sum_{j=1}^{2}\lambda_{ij}\left(1-\rho_{ij}\right)\right)\end{aligned} \tag{12}$$

The expected Backorder at the CMC for repair equals:

$$\begin{aligned}\mathrm{EBO}_{i0}^{\mathrm{RP}}\left(s_{i0}\right)=&\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}\frac{\left(\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}\right)^{s_{i0}}}{s_{i0}!}e^{-\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}}\\&+\left(\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}-s_{i0}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{i0}}\frac{\left(\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}\right)^{l}}{l!}e^{-\mu_{i0}^{\mathrm{RP}}}\right)\end{aligned} \tag{13}$$

The expected Backorder at the CMC for AM equals:

$$\begin{aligned}\mathrm{EBO}_{i0}^{\mathrm{AM}}\left(s_{i0}\right)=&\mu_{i0}^{\mathrm{AM}}\frac{\left(\mu_{i0}^{\mathrm{AM}}\right)^{s_{i0}}}{s_{i0}!}e^{-\mu_{i0}^{\mathrm{AM}}}\\&+\left(\mu_{i0}^{\mathrm{AM}}-s_{i0}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{i0}}\frac{\left(\mu_{i0}^{\mathrm{AM}}\right)^{l}}{l!}e^{-\mu_{i0}^{\mathrm{AM}}}\right)\end{aligned} \tag{14}$$

The total expected Backorder at the CMC equals:

$$\begin{aligned}\mathrm{EBO}_{i0}\left(s_{i0}\right)=&\mu_{i0}\frac{\left(\mu_{i0}\right)^{s_{i0}}}{s_{i0}!}e^{-\mu_{i0}}\\&+\left(\mu_{i0}-s_{i0}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{i0}}\frac{\left(\mu_{i0}\right)^{l}}{l!}e^{-\mu_{i0}}\right)\end{aligned} \tag{16}$$

Total Expected Backorder for the base

Let α be the meantime between shipment and receipt for the parts that will be done by AM. We are assuming that the Demand is given by a Poisson process, and using the fact that a sum of Poisson processes is a Poisson process (Sherbrooke 1992). Thus, the average Demand at the RMC will be composed of repairable parts at the base and the average fraction demand resupplied by CMC. Thus, a number of repairs equal:

For repairable:

$$\mu_{ij}^{RP}=\lambda_{ij}\left[\rho_{ij}\nu_{ij}+\left(1-\phi_{i0}\right)\left(1-\rho_{ij}\right)\left(\tau_{ij}+\frac{EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\lambda_{i0}}\right)\right] \tag{17}$$

For AM:

$$\mu_{ij}^{AM}=\lambda_{ij}\phi_{i0}\left[\left(1-\rho_{ij}\right)\left(\alpha_{ij}+\frac{EBO_{i0}^{AM}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\omega_{i0}}\right)\right] \tag{18}$$

Thus, the total number of repairs and AM equals:

$$\mu_{ij}^{RP}=\lambda_{ij}\left(\begin{aligned}&\left[\rho_{ij}\nu_{ij}+\left(1-\phi_{i0}\right)\left(1-\rho_{ij}\right)\left(\tau_{ij}+\frac{EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\lambda_{i0}}\right)\right]\\&+\phi_{ij}\left[\left(1-\rho_{ij}\right)\left(\alpha_{ij}+\frac{EBO_{i0}^{AM}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\omega_{i0}}\right)\right]\end{aligned}\right) \tag{19}$$

Where $\left(1-\phi_{i0}\right)\left(1-\rho_{ij}\right)\left(\tau_{ij}+\frac{EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\lambda_{i0}}\right)$ is the number of repair parts from CMC to RMC, and $\phi_{i0}\left[\left(1-\rho_{ij}\right)\left(\alpha_{ij}+\frac{EBO_{i0}^{AM}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\omega_{i0}}\right)\right]$ is the number of parts from CMC to RMC. The quantity $EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}^{RP}\right)$ is the expected number of resupply outstanding at the depot at a random point in time for repair and $EBO_{i0}^{AM}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}^{AM}\right)$ is the expected number of resupply outstanding at the depot for AM. The quantity $\frac{EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}^{RP}\right)}{\lambda_{i0}}$ represents the average delay added to resupply requests daily, resulting from the fact that the CMC does not always have stock on the shelf. t_{ij} represents the order-and-ship time from the CMC to the RMC. The quantity $\frac{EBO_{i0}^{AM}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}^{AM}\right)}{\omega_{i0}}$ represents the average delay added daily to resupply requests, resulting from the fact that the depot does not always have stock on the shelf for AM. And the α_{ij} represents the order-and-ship time from the CMC to the RMC for AM. The expected Backorder at the RMC for repair is as follows:

$$\begin{aligned}\mathrm{EBO}_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}\left(s_{ij}\right)=&\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}\frac{\left(\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}\right)^{s_{ij}}}{s_{ij}!}e^{-\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}}\\&+\left(\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}-s_{ij}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{ij}}\frac{\left(\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}\right)^{l}}{l!}e^{-\mu_{\mathrm{ij}}^{\mathrm{RP}}}\right)\end{aligned} \tag{20}$$

The expected Backorder at the RMC for AM is as follows:

$$EBO_{ij}^{AM}\left(s_{ij}\right)=\mu_{ij}^{AM}\frac{\mu_{ij}^{AM}}{s_{ij}!}e^{-\mu_{ij}^{AM}}+\left(\mu_{ij}^{AM}-s_{ij}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{ij}}\frac{\left(\mu_{ij}^{AM}\right)^{l}}{l!}e^{-\mu_{ij}^{AM}}\right) \quad (21)$$

The total expected Backorder at the RMC equals:

$$EBO_{ij}\left(s_{ij}\right)=\mu_{ij}\frac{\left(\mu_{ij}\right)^{s_{ij}}}{s_{ij}!}e^{-\mu_{ij}}+\left(\mu_{ij}-s_{ij}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{ij}}\frac{\left(\mu_{ij}\right)_{ij}^{l}}{l!}e^{-\mu_{ij}}\right) \quad (22)$$

5.5 Model 3

In this scenario, we propose that CMC will support the RMC only for the parts that are not repairable at the RMC. Nevertheless, the parts that will be done by AM will be manufactured at the RMC. Thus, the RMC center will have the AM machines to cover the Demand that will be potential for the AM (Figure 6).

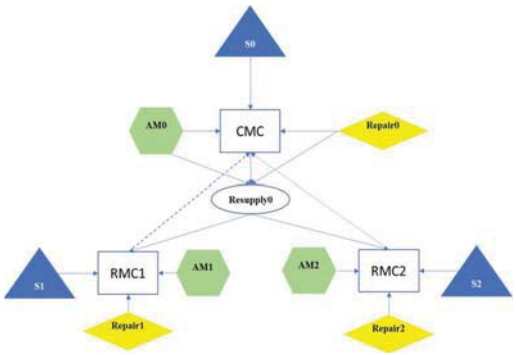


Figure 6: Scenario 3 with decentralized AM integration

Total Expected Backorder for the CMC

First, we must calculate the average Demand repairable at CMC plus the fraction of the average Demand that is not repairable from the RMC. Since we integrate the AM at CMC, let ϕ be the probability that the parts will be done by AM and $(1-\phi)$the probability that the parts will be done by CP. Thus, the average Demand is as follows:

Average Demand repairable with no AM at the CMC

$$\lambda_{i0}^{RP*}=\lambda_{i0}\rho_{i0}\left(1-\phi_{i0}\right) \quad (22)$$

Fraction average demand repairable from the base with no AM:

$$\lambda_{i0}^{RP**}=\sum_{j=1}^{2}\lambda_{ij}\left(1-\rho_{ij}\right) \quad (23)$$

Average Demand repairable with AM at CMC

$$\omega_{i0}=\phi_{i0}\lambda_{i0}\rho_{i0} \quad (24)$$

Thus, the number of parts that is not repairable at the CMC is as follows:

For repair: $\mu_{i0}^{RP}=\nu_{i0}\lambda_{i0}^{RP*}+\nu_{i0}\lambda_{i0}^{RP*}$ (25)

For AM: $\mu_{i0}^{AM}=\gamma_{i0}\omega_{i0}$ (26)

Thus, the total number of repairs at CMC:

$$\mu_{i0}=\nu_{i0}\lambda_{i0}^{RP*}+\nu_{i0}\lambda_{i0}^{RP**}+\gamma_{i0}\omega_{i0} \quad (27)$$

$$\mu_{i0}=\nu_{i0}\lambda_{i0}\rho_{i0}\left(1-\varphi_{i0}\right)+\nu_{i0}\sum_{j=1}^{2}\lambda_{ij}\left(1-\rho_{ij}\right)+\gamma_{i0}\varphi_{i0}\lambda_{i0}\rho_{i0} \quad (28)$$

Thus, the total Expected Backorder for the depot.

$$EBO_{i0}\left(s_{i0}\right)=\mu_{i0}\frac{\left(\mu_{i0}\right)^{s_{i0}}}{s_{i0}!}e^{-\mu_{i0}}+\left(\mu_{i0}-s_{i0}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{i0}}\frac{\left(\mu_{i0}\right)_{ij}^{l}}{l!}e^{-\mu_{i0}}\right) \quad (29)$$

Total Expected Backorder for the base

We are assuming that the Demand is given by a Poisson process, and using the fact that a sum of Poisson processes is a Poisson process (Sherbrooke 1992). Thus, the average Demand at the RMC will be composed of repairable parts at the base and the average fraction demand resupplied by CMC. Thus, a number of repairs are as follows:

Average Demand repairable at RMC with no AM

$$\lambda_{ij}^{*}=\lambda_{ij}\rho_{ij}\left(1-\phi_{ij}\right) \quad (30)$$

Average Demand repairable at RMC with AM

$$\omega_{ij}=\phi_{ij}\lambda_{ij}\rho_{ij} \quad (31)$$

The number of repairs with no AM at RMC is as follows:

$$\mu_{ij}^{RP*}=\left(1-\phi_{ij}\right)\lambda_{ij}\rho_{ij}\nu_{ij} \quad (32)$$

The number of repairs resupplied with no AM from CMC to RMC is as follows:

$$\mu_{ij}^{RP**}=\lambda_{ij}\left(1-\varphi_{ij}\right)\left(1-\rho_{ij}\right)\left(\tau_{ij}+\frac{EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\lambda_{i0}}\right) \quad (33)$$

Thus the total repair is as follows:

$$\mu_{ij}^{RP} = \lambda_{ij}\left(1-\phi_{ij}\right)\left[\rho_{ij}v_{ij} + \left(1-\rho_{ij}\right)\left(\tau_{ij} + \frac{EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\lambda_{i0}}\right)\right] \quad (34)$$

The number of repairs with AM at CMC is as follows:

$$\mu_{ij}^{AM} = \lambda_{ij}\phi_{ij}\gamma_{ij}\rho_{ij} \quad (35)$$

The total number of repairs at CMC is as follows:

$$\mu_{ij}^{RP} = \lambda_{ij}\left[\begin{array}{l}\left(1-\phi_{ij}\right)\left(\rho_{ij}v_{ij} + \left(1-\rho_{ij}\right)\left(\tau_{ij} + \dfrac{EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}\right)}{\lambda_{i0}}\right)\right) \\ +\phi_{ij}\gamma_{ij}\rho_{ij}\end{array}\right] \quad (36)$$

The quantity $EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}^{RP}\right)$ is the expected number of resupply outstanding at the CMC at a random point in time for repair and. The quantity $\frac{EBO_{i0}^{RP}\left(s_{i0}\middle|\mu_{i0}^{RP}\right)}{\lambda_{i0}}$ represents the average delay added daily to resupply requests, resulting from the fact that the CMC does not always have stock on the shelf.

The expected Backorder at the RMC for repair is as follows:

$$\begin{aligned}\mathrm{EBO}_{ij}^{\mathrm{RP}}\left(s_{ij}\right) &= \mu_{ij}^{\mathrm{RP}}\frac{\left(\mu_{ij}^{\mathrm{RP}}\right)^{s_{ij}}}{s_{ij}!}e^{-\mu_{ij}^{\mathrm{RP}}} \\ &+\left(\mu_{ij}^{\mathrm{RP}} - s_{ij}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{ij}}\frac{\left(\mu_{ij}^{\mathrm{RP}}\right)^{l}}{l!}e^{-\mu_{ij}^{\mathrm{RP}}}\right)\end{aligned} \quad (37)$$

The expected Backorder at the RMC for AM is as follow:

$$\begin{aligned}\mathrm{EBO}_{ij}^{\mathrm{AM}}\left(s_{ij}\right) &= \mu_{ij}^{\mathrm{AM}}\frac{\left(\mu_{ij}^{\mathrm{AM}}\right)^{s_{ij}}}{s_{ij}!}e^{-\mu_{ij}^{\mathrm{AM}}} \\ &+\left(\mu_{ij}^{\mathrm{AM}} - s_{ij}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{ij}}\frac{\left(\mu_{ij}^{\mathrm{AM}}\right)^{l}}{l!}e^{-\mu_{ij}^{\mathrm{AM}}}\right)\end{aligned} \quad (38)$$

The total expected Backorder at the RMC is as follows:

$$\mathrm{EBO}_{ij}\left(s_{ij}\right) = \mu_{ij}\frac{\left(\mu_{ij}\right)^{s_{ij}}}{s_{ij}!}e^{-\mu_{ij}} + \left(\mu_{ij} - s_{ij}\right)\left(1-\sum_{l=0}^{s_{ij}}\frac{\left(\mu_{ij}\right)_{ij}^{l}}{l!}e^{-\mu_{ij}}\right) \quad (39)$$

6 NUMERICAL EXAMPLE

In this section, we present the scenarios calculation. The goal is to show the best configuration of additive manufacturing. The result is compared to the baseline scenario, which is the scenario with no AM configuration. Table 1 presents a sample of spare part data used for calculation.

		λ	ν	ρ	τ	ɣ	α
CMC	j=0	80	0.16	1	0.45	0.01	0.03
RMC1	j=1	80	0.49	0.85	0.45	0.03	0.03
RMC2	j=2	80	0.49	0.85	0.45	0.03	0.03

Table 1: Spare parts sample

Figure 7 presents the calculation result of the three scenarios for different AM probability ϕ = 10% to 90% (incremental 10%) of the parts made with AM. Figure 7 was drawn based on Table 1, and it showed clearly that the third scenario (model 3) is the best scenario for the integration of AM.

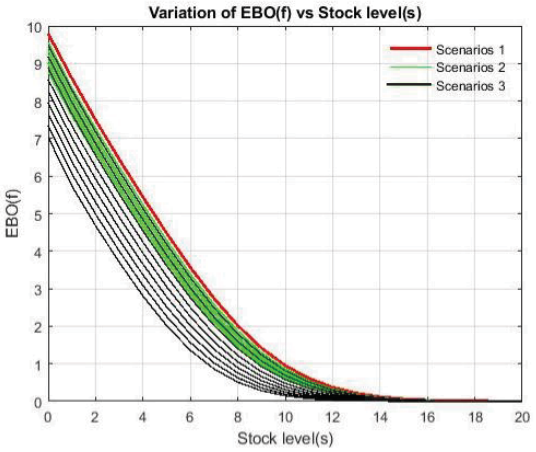


Figure 7: The three scenarios with different ϕ

Figure 8 presents the optimal stock, where the AM scenario is inferior to the baseline. At the stock level 14, the three scenarios are at the same level, which is considered as the optimal stock where is the integration of the AM does not represent any value added to the multi-echelon system.

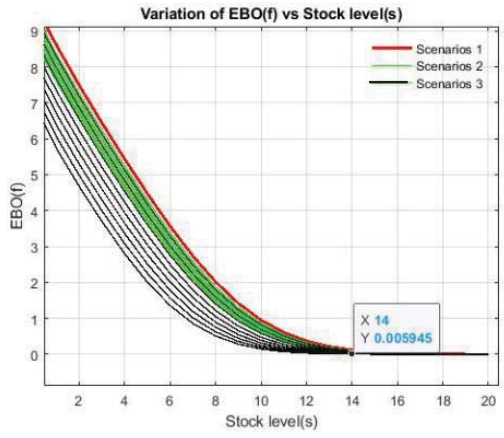


Figure 8: The optimal stock for the three scenarios with different ϕ

Let consider that the repair time of AM is superior to conventional process repair time. Figure 9 shows clearly that scenario 1(model 1) is the best solution. Thus, AM's integration relies on the repair time, which should be inferior to that conventional process repair time. Thus, in a multi-echelon system, the AM has value-added only if the repair time with AM is inferior to the current manufacturing process.

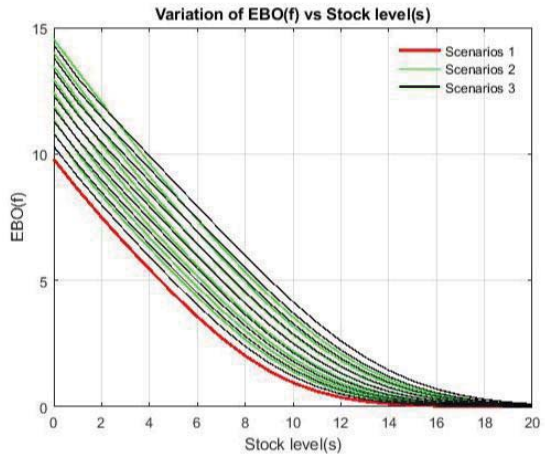


Figure 9: The repair time of AM is superior to CP repair time

Figure 10 considers that the repair time is equal for both conventional and AM process. Thus, the three scenarios are equal.

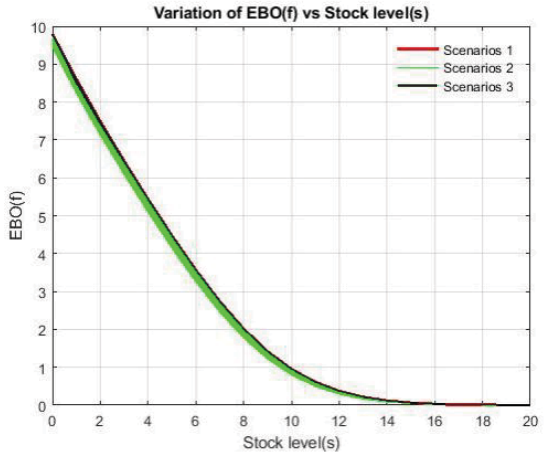


Figure 10: The repair times are equal for AM and CP.

Let consider that the shipment time of AM is superior to the conventional process. Figure 11 shows clearly that there is no impact, and scenario 3 remains the best solution.

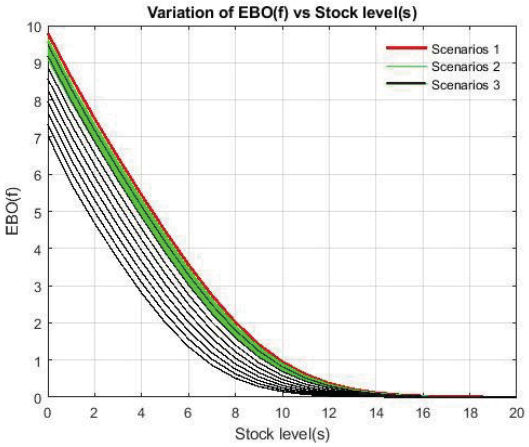


Figure 11: The shipment time of AM is superior to the conventional process

7 DISCUSSION AND CONCLUSION

In this study, we analyze the potential integration of additive manufacturing in the multi-echelon system. Three scenarios were considered in order to identify the best configuration of the multi-echelon system.

This analysis showed clearly that the best scenario for AM manufacturing integration is scenario 3 (model 3), which consider decentralized AM location. The analysis is based on the parameters chosen for the calculation in Table 1.

The integration of AM is valuable for the multi-echelon system. This helps the aerospace company to have an optimal reallocation for the spare parts inventory. However, an optimal stock favors this integration, which means that the integration of AM is not required at a specified stock level and will not bring any value added to the multi-echelon system.

As a future direction, it will be relevant to consider different parameters using an experimental design to evaluate the interaction between parameters to develop the best combination of parameters that optimize the stock and AM integration. Besides, calculating the cost of the EBO of the three scenarios using marginal analysis is required. As a limitation, the example calculation is carried out only on one item; it would be relevant to consider the multi-item analysis.

REFERENCES

AviationWeek : Overhaul& Maintenance 2011;17(4):28–31.

AW&ST. 2013."The MRO global leading players". Aviation Week and Space Technology, MRO Edition, Aviation Week Ranks. April 2013.

Clark, A. J., & Scarf, H. (1960). Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. Management Science, 6(4), 475-490.

Craig C. Sherbrooke. METRIC: A Multi-Echelon Technique For Recoverable Item Control. Operations Research, 16(1):122-141, 1968.

Craig C. Sherbrooke. Optimal Inventory Modeling of Systems. In Wiley Interscience. Wiley, New York, 1992.

Cohen, M. A., Agrawal, N., Agrawal, V., 2006. Winning in the Aftermarket. Harv. Bus. Rev. 84, 129–138.

Ellis, S.,K. Knickle, P. Manenti. 2009. The modern supply chain: Inventory optimization competitive assessments.

G.J. Feeney and C.C. Sherbrooke. The (s-1; s) Inventory Policy Under Compound Poisson Demand. Management Science, 12(5):391-411, 1966.

Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., Walter, M., 2010. Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. J. Manuf. Technol. Manag. 21, 687–697.

Kaebernick, H., 2014. Green Manufacturing, Fundamentals, and Applications. J. Ind. Ecol. 18, 591–592.

Liu, P., Huang, S. H., Mokasdar, A., Zhou, H., et Hou, L. (2014). The impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain: supply chain operation reference (scor) model based analysis. Production planning & control, 25(13-14), 1169-1181.

Khajavi, S. H., Partanen, J., Holmström, J., 2014. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. Comput. Ind. 65, 50–63.

Martin, H., Syntetos, A. A., Parodi, A., Polychronakis, Y. E., & Pintelon, L. (2010). Integrating the spare parts supply chain: an inter-disciplinary account. Journal of Manufacturing Technology Management, 21(2), 226-245.

Mashhadi, A. R., Esmaeilian, B., Behdad, S., 2015. Impact of additive manufacturing adoption on future of supply chains, in ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, p. V001T02A064-V001T02A064.

Muckstadt, J. A., & Thomas, L. J. (1980). Are multi-echelon inventory methods worth implementing in systems with low-demand-rate items?. Management Science, 26(5), 483-494.

Zipkin, P. H. (2000). Foundations of inventory management.

Title: AI in Supply chain performance and resilience: a literature review

Mariam ATWANI[1,3], El Hassan LAAZIZ[2,3]
[1]LASTIMI Laboratory, Mohammedia School of Engineers (EMI)
High School of Technology (EST),
Mohammed V University in Rabat, Morocco
[2] ESITH Higher School of Textile and Clothing Industries
[3] CELOG Centre of Excellence in LOGistics, ESITH

Mustapha HLYAL[2,3], Jamila EL ALAMI[4]
[2] ESITH Higher School of Textile and Clothing Industries
[3] CELOG Centre of Excellence in LOGistics, ESITH
[4] High School of Technology (EST),
Mohammed V University in Rabat, Morocco

ABSTRACT: *The challenges of the supply chain are important and will become even more so. Sustainable performance and resilience occupy a large part of the contributions and research work related to the supply chain and logistics, on the one hand because of the risks inherent in the supply chain (uncertainty relating to demand, stochasticity, and bullwhip effect) and on the other hand, because of external disturbances, risks and crises which can temporarily or durably impact Customer's Service. The applications of Artificial Intelligence in this area have experienced a boom over the last 3 decades. The proliferation of Artificial Intelligence applications in this area would be an opportunity for better performance control and a way to better build and build resilience.*
The aim of this article is to review the literature on the application of Artificial Intelligence most used approaches in the supply chain, its planning, prediction, risk analysis with the aim of sustainable performance and its resilience.

KEYWORDS: *Artificial Intelligence, Supply Chain, Supply Chain Risk Management, performance, resilience*

1. INTRODUCTION

The supply chain (SC) of a product, which is the succession of links in the supply chain for this product, involves several challenges. On the one hand, those of the logistical operations that make it up (operations, transport, storage, etc.), and those that are more transversal, namely: planning, forecasting, risk prediction and their mitigation. These latter issues, it seems, have more impact on its agility, flexibility, performance and resilience.
Monitoring and controlling supply chain performance and its resilience has developed very rapidly over the past three decades, thanks in particular to the advent of several benchmarks (including SCOR) but also the integration of news technologies such as Artificial Intelligence (whose first applications of the last centuries concern robotics), which is the result of the expansion of the Internet and then of connected objects, which has given rise to an accelerated and continuous proliferation data, notably in the strands and interfaces of the supply chain.
Currently, the proliferation of Artificial Intelligence (AI) applications in this field would be an opportunity for better performance control and a way to better build and build resilience.
In this article, the objective is to do a literature review on the application of AI in the supply chain, its planning, prediction, risk analysis with the objective of sustainable underperformance and its resilience. This review is focused on cross-cutting issues related to planning, forecasting, risk prediction and supplier relations. The article is made up of two sections. The first describes the art in terms of the application of artificial intelligence concerning these issues. The second section gives a conclusion and perspectives.

2. ARTIFICIAL INTELLIGENCE: APPLICATIONS

2.1. History & Definitions

Artificial Intelligence (AI) began in 1950 with the mathematician Alan Turing after the creation of the Turing Test, according to (Solomonoff 1985), its modern phase began in 1956 with the Dartmouth Summer Study Group on Artificial Intelligence, a group that assembled many people working in AI.
"Logic Theorist" and "General Problem Solver" were one of the first fruits practicing the general theory of AI and giving it the first tools to work. (Pomian 1987). The studies on "Human problem solving" also led to "Cognitive Psychology", a fundamental science that combines with Artificial Intelligence.
Since the beginning of the 21st century, the field of Artificial Intelligence has undergone a considerable evolution thanks to the development of computer science and the progress of research in Big Data and Machine Learning. (Baryannis et al. 2019)
Through its characteristics, the field of AI is constantly changing, so its definition is constantly evolving.
According to Bringsjord and Schimanski, "Some agent is intelligent if and only if it excels at all established,

validated tests of intelligence".(Bringsjord and Schimanski 2003).
As for Legg and Hutter, they consider a Human or a machine to be intelligent if they meet the following pre-requisites: 1. the ability to decide what to do in order to achieve one's goals; 2. the ability to cope, through learning and adaptation, with a range of eventualities that cannot be anticipated. (Legg and Hutter 2007).
Thus, according to Marvin Lee Minsky (1956), Artificial Intelligence is defined as "the construction of computer programs that engage in tasks that are, for the time being, more satisfactorily performed by human beings, because they require high level mental processes such as: perceptual learning, memory organization and critical reasoning". Its aim is to develop and create "Thinking machines" capable of imitating, learning and replacing human intelligence. (Min 2010), it relies on algorithms whose behaviour evolves over time according to the data provided, capable of searching for information and analysing the data in an intelligent way.
On the other hand, Russel & Norving define AI as the ability to think like a Human, act like a Human, think rationally and act rationally. (Norvig 1996), consequently, AI can be classified into four sub-field: 1. artificial neural networks (ANN) and Rough set theory , 2. machine learning, expert systems, and Genetic Algorithms, 3. fuzzy logic, 4. agent-based systems (Min 2010).

2.2. AI applications in SCM

2.2.1. Artificial neural networks (ANN)

An artificial neural network (ANN) is a set of artificial neurons whose purpose is to simulate the way the human brain processes and analyses information, in order to solve problems that are evaluated as difficult for humans to solve.
ANNs are composed of several nodes, linked together by links. Thanks to a set of learning rules, the ANNs use the "input" information and generate, through an internal weighting system, the "outputs". Their self-learning system allows them to provide the best results.
The decision in the supply chain, for the three operational, tactical and strategic levels has been the traditional field for the application of operational research, since the 80s and decades, long before for logistics, transport, planning and the ordering of operations.
Nowadays, the interconnectivity and interdependence of SC processes becomes more complexes and better fed by data. ANN is designed to reflect the interconnectivity and interdependence of SC planning processes better than traditional operational research (OR) techniques that were primarily intended for solving less-integrated sub-problems (e.g., inventory or production or transportation planning) of SC planning. (Min 2010)
One of the most successful ANN applications is the hierarchical SC planning to determine setup times, optimal lot-size across SC processes, and required inventory levels to demand and production planning.
In terms of risk assessment, Bruzzone and Orsoni, employed Artificial Neural Networks (ANNs) to calculate the expected costs and risks of production losses and compare with another methodology based on simulation, the results reveals that the ANNs based methodology allows a more efficient cost estimation thanks to the chosen modular structure: The ANNs are supplied with specific scenarios with production times, quantities and capacities (input), along with corresponding cost estimates (output). Based on these training data, the ANNs learn how to correlate input and output, gaining the capability of calculating cost estimates for different scenarios. (Bruzzone and Orsoni 2003).
For upstream supply chain and supplier's relationship, we found much more contributions. In (Zhao and Yu 2011) the authors used ANNs to solve the key problems of the CBR (Case based reasoning) system of supplier selection. Thanks to its strong self-adaptability, the ANNs improve the accuracy of updating phases and the efficiency of the decision-making in the companies' process of selecting suppliers. In (Jiang and Sheng 2009) we found a learning algorithm to the supplier selection process improvement. Bayesian learning was used in (Chen, Xia, and Wang 2010) to evaluate the suppliers reliability, and to show that although several parameters have not been considered, the model remains flexible and can be extrapolated taking into account other factors. In (Garvey, Carnovale, and Yeniyurt 2015), the authors modelled risk dependency graphs. The latter model is able to adapt depending on new knowledge is acquire, thus making sure that risk propagation is modelled accurately. (Baryannis et al. 2019)

2.2.2. *Rough set theory*

The raw set theory is a mathematical tool used to solve vague, uncertain, imprecise and noisy data, it consists in drawing two precise boundaries to describe an imprecise concept: lower and upper approximation of the original data sets.
Dynamic SC performance measurement is not only paramount for its resilience and agility but it is also the basis for the decision making process. Rough set theory is used for such a matter. In (Zheng and Lai 2008) we found a multiple criteria decision framework giving rules for supply chain measurement. It was used for the upstream supply chain performance monitoring in (Li, Yamaguchi, and Nagai 2007). Regarding to (Bai and Sarkis 2014) rough set theory was used to evaluate sustainability performance for suppliers through the identification of the key performance indicators (KPIs) allowing this assessment.
(Lei, Jun, and Hong-li 2014) established a model to determine the combinatorial judgment matrix based on two judgment matrices: objective and subjective. In (Geng and Liu 2015), a mining algorithm has been developed using criterion weighting. The authors above-mentioned used rough set theory to select the most desirable supplier among a pool of qualified suppliers

with respect to multiple but conflicting supplier selection criteria.
Moreover , the rough set theory is also used in SCM core functions such as inventories management, e.g, in (Mehdizadeh 2020) the use of rough set theory allows a reduction of bullwhip effects and resulted in optimal inventory management and a better service rate, the model developed establishes rules and correct uncertain information obtained by ABC analysis. As for (Karimi 2018), they used the rough set theory for the supply chain risk assessment in services, and studied the case of Payment Service Providers.

2.2.3. *Machine Learning*

Machine Learning (ML) is a process that takes advantage of experience to learn without being obviously programmed and improve its performance. by referring to past information from electronic data collection.
The well-known types of ML are: 1. supervised: tasks are classification and regression, 2. unsupervised: tasks are Association Rules, Self-Organizing Maps, Multidimensional Scaling and Nonlinear Dimension Reduction, 3. reinforcement learning: the system finds its own solutions autonomously through directional rewards and punishments.
Indeed, ML consists in predicting behaviour, so it is widely used to solve several supply chain issues, both in upstream and downstream phases. (Wenzel, Smit, and Sardesai 2019) classified the links of the supply chain management, and, through the study of 38 papers, indicated the use of machine learning techniques in supply chain management, grouped as follows:

Task Area	Sub-function	Application/ Results
Supply Chain Design (SCD)	Supplier selection	Detect and evaluate supplier risk
		Creation of a supplier selection system
		Create a solution able to negotiate contracts
		Identify reliable candidates for future customer-supplier relationship
Supply Chain Planning (SCP)	Demand planning	To solve forecasting problems during a catastrophe
		Predict future demand
		To deal with the bullwhip effect through the prediction of distorted demand information and share it with the SC partners
		Make accurate forecasts over a six month horizon
		Use data provided by social media to establish sales forecasts
	Procurement planning	Create more effective procurement planning in the drugstores to achieve high product availability
		Set the product price
	Distribution planning	Solve vehicle scheduling problems in the cross-docking
Supply Chain Execution (SCE)	Order management	Establish an optimal ordering strategy on several levels of the SC
		Classify SKUs according to demand and performance attributes
		Evaluate order priority
		Identify the manufacturing priority of an order
	Inventories management	Determine the elements that impact inventory management
		Optimize reorder points and safety stocks for product
		Identify obsolete products n=in a warehouse
		Calculate order point in the replenishment method
	Production management	Identify manufacturing location of products: ratified factory or unknown origin
		Calculate the cycle time
		Estimate the lead time
	Transport management	Differentiate between moving and static pallets and avoid False-Positive RFID Tag Reads

Table 1. ML applications in SC

Furthermore, (Bousqaoui, Achchab, and Tikito 2017) cited some of ML algorithms, and showed that the most commonly used one is neural network, then the linear regression after the support vector machine, in planning, procurement, production, inventories, transportation and distribution, but are mainly employed in forecasting. So, the authors have closely studied in (Bousqaoui, Achchab, and Tikito 2019) the ability of ML to generate more accurate forecasts than traditional methods thanks to a long short-term model. In the same context, (Hoppe 2019) show that ML algorithms are largely applied in planning.

2.2.4. *Expert system*

An expert system is capable of answering questions, using reasoning based on known facts and rules. It can be used in particular as a decision support tool. In addition, an expert system can be more useful than a single, more sophisticated forecasting method to forecast demand at each stage of SC, in terms of forecast accuracy, calculation speed, user understanding. and profitability (Min 2010).
As demonstrated by its effective application to air traffic, airline yield management and vehicle maintenance (Jefferies & Yeap, 2008), the application potential of the expert system is unlimited in the Supply Chain domain. As such, other interesting applications of the SC expert system include: supplier assessment, assessment and selection of third party logistics service

providers (3PL), formulation of a logistics strategy; and production planning and control (Min 2010), demand management (Tekez 2018),supplier and subcontractor evaluation (Shahvand, Sebt, and Banki 2016), development of a partner selection system (Sari 2018).

2.2.5. Genetic Algorithms

Genetic Algorithms (Gas) are aleatory research algorithms that imitates natural genetics. They aim to solve a high level of problem using a randomized information exchange (Roetzel, Luo, and Chen 2019)
GAs have been applied successfully to a variety of challenging SC network design problems (Min 2010). These problems include among others: the GA was employed to solve well-known logistics problems involving facility layout (Balamurugan et al., 2006); inventory control (Haq & Kannan, 2006); delivery reliability assurance (Antony et al. 2006); freight consolidation (Min, Ko, and Ko 2006); and express courier services (Ko, Min, and Ko 2007). For upstream supply chain process, the GAs were employed in purchasing for supplier selection (Venkata Rao 2007).
In the other hand, (Jauhar and Pant 2016) studied 220 articles to identify the application of GAs in SC, the study reveals that GAs algorithms are mainly applied in the manufacturing flow management and in order fulfilment, the following table summarises the results of the study.

Process	Sub-function	Application / Results
Manufacturing flow management (MFM)	Inventory management	Determine lot-size scheduling issues
		Elaborate multiproduct economic production quantity model, including various constraints
		Inventory optimization
		Calculate economic order quantity
		Solve inventory issues
	Planning	Develop optimum resolution
		Optimal process planning, decreasing delays
		Solve job-shop scheduling problems
		Include more constraints to solve scheduling problems
		Solve capacitated lot-size problems
		Optimize customer orders
		Solve distribution scheduling problems
		Solve machine assignment problems
		Optimize the process planning in Enterprise resource planning (ERP)
		Joint optimization of production planning and supplier selection taking into account customer flexibility
Order fulfillment	Logistics network Design / planning	Select the ultimate production/distribution design in multistage logistic network
		Correct unstable multistage logistics systems
		Optimize the total costs for un just in time service level
		Solve distribution network problems
		Reduce shipment costs
		Optimize supply chain costs of defective goods
		Optimize reverse logistics network
	Vehicle routing/ assignment	Reduce transportation charges
		Find solutions for problems related to logistics centers location
		Optimize warehouse order-picking routes
Demand management	Sales forecasting	Develop accurate forecasting algorithms
		Reduce bullwhip effect
Procurement	Supplier relationship management	Evaluate supplier risk
		Select reliable supplier

Table 2. GAs applications in SC

2.2.6. *fuzzy logic*

Fuzzy logic can be useful for developing a set of rules for SC decision environments where subjective performance criteria have to be employed. Earlier approaches dealt with only a small number of fuzzy parameters but more recent studies have suggested models with larger instances with more parameters (Baryannis et al. 2019).
We found specific applications to supply chain performance and resilience of the fuzzy logic concerning inventory cost control (Wang and Shu 2005), order fulfilment (Amer et al. 2008) and measurement of the bullwhip effect (Balan, Vrat, and Kumar 2007). One can find Specific applications to agro-industry SC planning in (Yandra et al. 2007). For upstream SC, supplier performance evaluation and selection, relevant application were found in (Carrera and Mayorga 2008; Lau, Kai Pang, and Wong 2002; Min 2010).
More focused contributions on SC resilience could be found in (Micheli, Mogre, and Perego 2014) and (Tang, Lau, and Ho 2008). In the former the authors elaborated a decision support framework that implicates the SC actors in the SC Relationship Management process. Their framework identifies the risks, the mitigation actions, the definition of probabilities and impact of the risks. In the latter, we found a fuzzy programming study focussing on risk assessment rather than risk mitigation.

2.2.7. *Agent-based systems*

Agent-based system is a system made up of a set of agents (a process, a robot, a human being, etc.), located in a certain environment and interacting according to certain relationships. An agent is an entity characterized by the fact that it is, at least partially, autonomous. Agent-based system has often been employed to handle various SC issues including shop floor control, logistics planning, air traffic control, customer relationship management (CRM), bidding evaluation, material handling, e-logistics and new product development (Min 2010).

In terms of SC performance monitoring and optimization, we found relevant valuable application to solve the problem of demand fluctuation in (Du, Sugumaran, and Gao 2017), for joint production planning in (Lima, Sousa, and Martins 2006), for order monitoring (Chen and Wei 2007) and for outsourcing relationship management. Agent-based systems have also been used as simulation tools for inventory management to reduce costs and improve fill rate in (Chan and Chan 2006), and to study interaction between inventory models in (Ponte et al. 2017).

Contributions dealing with factors impacting SC resilience, even indirectly, are found in (Ghiassi and Spera 2003) concerning SC relationship management and in (Giannakis and Louis 2016) in terms of SC agility improvement through autonomous corrective actions.

The coordination in supply chain, a paramount factor in its resilience versus the bullwhip effect was widely studied. One can find several thoughts about SC performance improvement, lead time reduction, and bullwhip effect reducing in (Alzoubi 2018). The bullwhip effect mitigation and cost reduction in a multi-stage supply chain was studied in (Zarandi, Pourakbar, and Turksen 2008) and collaboration issues under supply and demand uncertainty were analysed in (Kwon, Im, and Lee 2007) to resolve collaboration issues among supply chain entities that arise due to uncertain supply and demand and to reduce costs and the bullwhip effect . As for (Hsu et al. 2016) , an Agent-based model is proposed to solve SC planning and scheduling problems.

Collaboration across supply chain and between SC actors is also widely studied as it contributes in SC resilience and strength versus the competitors. We cite among others: (Kwon et al. 2007) for collaboration under uncertainty; (Pan and Choi 2016) concerning price and delivery date negotiation among SC partners; (Singh, Salam, and Iyer 2005) for information tracking across the SC and e-supply chains.

Closer to SC resilience, (Bansal et al. 2005) suggested an agent-based approach monitoring key performance indicators for disruptions identification and for mitigation actions evaluation.

3. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

This review examined the existing literature on the application of artificial intelligence in the Supply Chain, particularly in planning, forecasting and risk analysis with the objective of its resilience and performance. In conclusion, according to the above, agent technology is far more applied than mathematical optimisation due to its ability to capture negotiation and coordination between different parties with less effort. However, the majority of papers propose a hybrid approach for an agile, flexible and efficient Supply Chain, where a genetic algorithm is used to solve a stochastic model at several stages of the problem, but the ability of the individuals in each iteration is calculated using an agent-based simulation. (Baryannis et al., 2019).

This article is therefore a preamble to a more in-depth review of Artificial Intelligence techniques, with a comparison of applications in terms of software, Information System and field applications.

REFERENCES

Alzoubi, H. 2018. "The Role of Intelligent Information System in E-Supply Chain Management Performance." *International Journal of Multidisciplinary Thought* (January).

Amer, Yousef, Lee Luong, Sang Heon Lee, and M. Azeem Ashraf. 2008. "Optimizing Order Fulfillment Using Design for Six Sigma and Fuzzy Logic." *International Journal of Management Science and Engineering Management*.

Antony, Jiju, Rahul Swarnkar, Maneesh Kumar, and Manoj Kumar Tiwari. 2006. "Design of Synchronised Supply Chain: A Genetic Algorithm Based Six Sigma Constrained Approach." *International Journal of Logistics Systems and Management*.

Bai, Chunguang, and Joseph Sarkis. 2014. "Determining and Applying Sustainable Supplier Key Performance Indicators." *Supply Chain Management*.

Balamurugan, K., V. Selladurai, and B. Ilamathi. 2006. "Solving Unequal Area Facility Layout Problems Using Genetic Algorithm." *International Journal of Logistics Systems and Management* 2(3):281–301.

Balan, S., Prem Vrat, and Pradeep Kumar. 2007. "Reducing the Bullwhip Effect in a Supply Chain with Fuzzy Logic Approach." *International Journal of Integrated Supply Management*.

Bansal, Mukta, Arief Adhitya, Rajagopalan Srinivasan, and I. A. Karimi. 2005. "An Online Decision Support Framework for Managing Abnormal Supply Chain Events." *Computer Aided Chemical Engineering*.

Baryannis, George, Sahar Validi, Samir Dani, and Grigoris Antoniou. 2019. "Supply Chain Risk Management and Artificial Intelligence: State of

the Art and Future Research Directions." *International Journal of Production Research*.

Bousqaoui, Halima, Said Achchab, and Kawtar Tikito. 2017. "Machine Learning Applications in Supply Chains." *3rd International Conference of Cloud Computing Technologies and Applications*.

Bousqaoui, Halima, Said Achchab, and Kawtar Tikito. 2019. "Machine Learning Applications in Supply Chains: Long Short-Term Memory for Demand Forecasting." in *Lecture Notes in Networks and Systems*.

Bringsjord, Selmer, and Bettina Schimanski. 2003. "What Is Artificial Intelligence? Psychometric AI as an Answer." in *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence*.

Bruzzone, A., and A. Orsoni. 2003. "AI and Simulation-Based Techniques for the Assessment of Supply Chain Logistic Performance." in *Proceedings - Simulation Symposium*.

Carrera, Diego A., and Rene V. Mayorga. 2008. "Supply Chain Management: A Modular Fuzzy Inference System Approach in Supplier Selection for New Product Development." *Journal of Intelligent Manufacturing*.

Chan, F. T. S., and H. K. Chan. 2006. "A Simulation Study with Quantity Flexibility in a Supply Chain Subjected to Uncertainties." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.

Chen, Min, Yusen Xia, and Xinlei Wang. 2010. "Managing Supply Uncertainties through Bayesian Information Update." *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.

Chen, Yee Ming, and Cheng-Wei Wei. 2007. "Multi-Agent-Oriented Approach to Supply Chain Planning and Scheduling in Make-to-Order Manufacturing." *International Journal of Electronic Business* 5(4):427–54.

Disney, Stephen Michael, Mohamed Mohamed Naim, and Denis Royston Towill. 2000. "Genetic Algorithm Optimisation of a Class of Inventory Control Systems." *International Journal of Production Economics* 68(3):259–78.

Du, Juan, Vijayan Sugumaran, and Bonan Gao. 2017. "RFID and Multi-Agent Based Architecture for Information Sharing in Prefabricated Component Supply Chain." *IEEE Access*.

Findler, N. V. 1987. "Air Traffic Control: A Challenge for AI." *AI Expert* 2(1):59–66.

Garvey, Myles D., Steven Carnovale, and Sengun Yeniyurt. 2015. "An Analytical Framework for Supply Network Risk Propagation: A Bayesian Network Approach." *European Journal of Operational Research*.

Geng, Xiuli, and Qinming Liu. 2015. "A Hybrid Service Supplier Selection Approach Based on Variable Precision Rough Set and VIKOR for Developing Product Service System." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.

Ghiassi, M., and C. Spera. 2003. "Defining the Internet-Based Supply Chain System for Mass Customized Markets." *Computers and Industrial Engineering*.

Giannakis, Mihalis, and Michalis Louis. 2016. "A Multi-Agent Based System with Big Data Processing for Enhanced Supply Chain Agility." *Journal of Enterprise Information Management*.

Haq, A. Noorul, and Govind Kannan. 2006. "Two-Echelon Distribution-Inventory Supply Chain Model for the Bread Industry Using Genetic Algorithm." *International Journal of Logistics Systems and Management*.

Hoppe, Magnus Tilmar. 2019. "Machine Learning in Supply Chain Management." (August).

Hsu, Chia Yu, Bo Ruei Kao, Van Lam Ho, Lin Li, and K. Robert Lai. 2016. "An Agent-Based Fuzzy Constraint-Directed Negotiation Model for Solving Supply Chain Planning and Scheduling Problems." *Applied Soft Computing Journal*.

Jauhar, Sunil Kumar, and Millie Pant. 2016. "Genetic Algorithms in Supply Chain Management: A Critical Analysis of the Literature." *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*.

Jefferies, Margaret E., and Wai-Kiang Yeap. 2008. *Robotics and Cognitive Approaches to Spatial Mapping*. Springer.

Jiang, Chengzhi, and Zhaohan Sheng. 2009. "Case-Based Reinforcement Learning for Dynamic Inventory Control in a Multi-Agent Supply-Chain System." *Expert Systems with Applications*.

Karimi, Touraj. 2018. "Service Supply Chain Risk Assessment Applying Rough Set Theory Approach: Case of Payment Service Providers." *Management Research in Iran* 22(1):69–94.

Ko, Chang Seong, Hokey Min, and Hyun Jeung Ko. 2007. "Determination of Cutoff Time for Express Courier Services: A Genetic Algorithm Approach." *International Transactions in Operational Research*.

Kwon, Ohbyung, Ghi Paul Im, and Kun Chang Lee. 2007. "MACE-SCM: A Multi-Agent and Case-Based Reasoning Collaboration Mechanism for Supply Chain Management under Supply and Demand Uncertainties." *Expert Systems with Applications*.

Lau, H. C. W., Wan Kai Pang, and Christina W. Y. Wong. 2002. "Methodology for Monitoring Supply Chain Performance: A Fuzzy Logic Approach." *Logistics Information Management*.

Legg, Shane, and Marcus Hutter. 2007. "Universal Intelligence: A Definition of Machine Intelligence." *Minds and Machines*.

Lei, WANG, Ye Jun, and Zhang Hong-li. 2014. "Rough Set and Analytic Hierarchy Process-Based Approach on Supplier Selection [J]." *Computer Science* 41(3):80–84.

Li, Guo Dong, Daisuke Yamaguchi, and Masatake Nagai. 2007. "Application of Grey-Based Rough Decision-Making Approach to Suppliers Selection." *Journal of Modelling in Management*.

Lima, R. M., R. M. Sousa, and P. J. Martins. 2006.

"Distributed Production Planning and Control Agent-Based System." in *International Journal of Production Research*.

Mehdizadeh, Masoud. 2020. "Integrating ABC Analysis and Rough Set Theory to Control the Inventories of Distributor in the Supply Chain of Auto Spare Parts." *Computers and Industrial Engineering*.

Micheli, Guido J. L., Riccardo Mogre, and Alessandro Perego. 2014. "How to Choose Mitigation Measures for Supply Chain Risks." *International Journal of Production Research*.

Min, Hokey. 2010. "Artificial Intelligence in Supply Chain Management: Theory and Applications." *International Journal of Logistics Research and Applications*.

Min, Hokey, Hyun Jeung Ko, and Chang Seong Ko. 2006. "A Genetic Algorithm Approach to Developing the Multi-Echelon Reverse Logistics Network for Product Returns." *Omega*.

Norvig, Stuart J. Russell and Peter. 1996. *Artificial Intelligence A Modern Approach Second Edition*.

Pan, An, and Tsan Ming Choi. 2016. "An Agent-Based Negotiation Model on Price and Delivery Date in a Fashion Supply Chain." *Annals of Operations Research*.

Pomian, Joanna. 1987. "Aux Origines de l'Intelligence Artificielle : H. A. Simon En Père Fondateur." *Quaderni*.

Ponte, Borja, Enrique Sierra, David de la Fuente, and Jesús Lozano. 2017. "Exploring the Interaction of Inventory Policies across the Supply Chain: An Agent-Based Approach." *Computers and Operations Research*.

Roetzel, Wilfried, Xing Luo, and Dezhen Chen. 2019. *Design and Operation of Heat Exchangers and Their Networks*.

Sari, Kazim. 2018. "Modeling of a Fuzzy Expert System for Choosing an Appropriate Supply Chain Collaboration Strategy." *Intelligent Automation and Soft Computing*.

Shahvand, E., M. H. Sebt, and M. T. Banki. 2016. "Developing Fuzzy Expert System for Supplier and Subcontractor Evaluation in Construction Industry." *Scientia Iranica*.

Singh, Rahul, A. F. Salam, and Lakshmi Iyer. 2005. "Agents in E-Supply Chains." *Communications of the ACM*.

Solomonoff, R. J. 1985. "The Time Scale of Artificial Intelligence: Reflections on Social Effects." *Human Systems Management*.

Tam, K. Y., and S. K. Chan. 1998. "Solving Facility Layout Problems with Geometric Constraints Using Parallel Genetic Algorithms: Experimentation and Findings." *International Journal of Production Research*.

Tang, C. X. H., H. C. W. Lau, and G. T. S. Ho. 2008. "A Conceptual Fuzzy-Genetic Algorithm Framework for Assessing the Potential Risks in Supply Chain Management." *International Journal of Risk Assessment and Management*.

Tekez, Esra Kurt. 2018. "Development of an Expert System for Demand Management Process." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.

Venkata Rao, Ravipudi. 2007. "Vendor Selection in a Supply Chain Using Analytic Hierarchy Process and Genetic Algorithm Methods." *International Journal of Services and Operations Management*.

Wang, Juite, and Yun Feng Shu. 2005. "Fuzzy Decision Modeling for Supply Chain Management." *Fuzzy Sets and Systems*.

Wenzel, Hannah, Daniel Smit, and Saskia Sardesai. 2019. *A Literature Review on Machine Learning in Supply Chain Management Supply Chain Management*.

Yandra, Marimin, Irawadi Jamaran, Eriyatno, and Hiroyuki Tamura. 2007. "An Integration of Multi-Objective Genetic Algorithm and Fuzzy Logic for Optimization of Agroindustrial Supply Chain Design." in *International Society for the Systems Sciences - 51st Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences, ISSS 2007*.

Zarandi, M. H. Faze., M. Pourakbar, and I. B. Turksen. 2008. "A Fuzzy Agent-Based Model for Reduction of Bullwhip Effect in Supply Chain Systems." *Expert Systems with Applications*.

Zhao, Kai, and Xin Yu. 2011. "A Case Based Reasoning Approach on Supplier Selection in Petroleum Enterprises." *Expert Systems with Applications*.

Zheng, Pei, and Kin Keung Lai. 2008. "A Rough Set Approach on Supply Chain Dynamic Performance Measurement." Pp. 312–22 in *KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*. Springer.

Supply Chain Planning in the Petroleum Industry: The Libyan Petroleum Sector Case Study

Otman Abdussalam *. Julien Trochu*. Nuri Fello **. Amin Chaabane *
** École de technologie supérieure, Montreal, Canada*
(e-mails : otman-ali.abdussalam.1@ens.etsmtl.ca , (trochu.julien@gmail.com), (amin.chaabane@etsmtl.ca).
*** National Oil Corporation, Libya (e-mail: nfello@gmail.com)*

Abstract: The primary purpose of this research is to develop a mathematical framework for the planning and optimization of the petroleum supply chains from the country-level perspective. Further, a deterministic mathematical model is presented to identify the decisions related to the flow between nodes, production capacities at each level, and how to satisfy the demand to maximize the profit from local and international markets. The developed model was solved by using commercial software, Supply Chain Guru. Furthermore, the Libyan petroleum case study is applied as an example to show possible improvements in the petroleum supply chain application, visualize the new supply chain configuration, and validate the results. Results show that the model allows improvements in both profit and service level if the right production and distribution decisions are set. Finally, the optimization model helps decision-makers identify the production and distribution plan under some risky events.

Keywords: petroleum supply chain, planning, optimization.

1. INTRODUCTION

The petroleum industry is in the heart of our modern societies. It is considered a strategic industry worldwide since oil products are the second most consumable resources across next to water [1]. It generates wealth to the industries and countries. The petroleum industry creates a challenge in supply chain development because different products are widely used in other economic activities with different costs. Furthermore, the consumption of petroleum products, especially in transportation, will be increasing in the future [2]. On the one hand, petroleum is the most important sector for both Gross domestic product (GDP) and export incomes.

On the other hand, it created many challenges for both academics and practitioners. Therefore, the optimization of supply chain operations is critical to managing the petroleum supply chain successfully. Traditionally, the petroleum supply chain comprises three streams, namely upstream, midstream, and downstream, as illustrated in Fig.1.

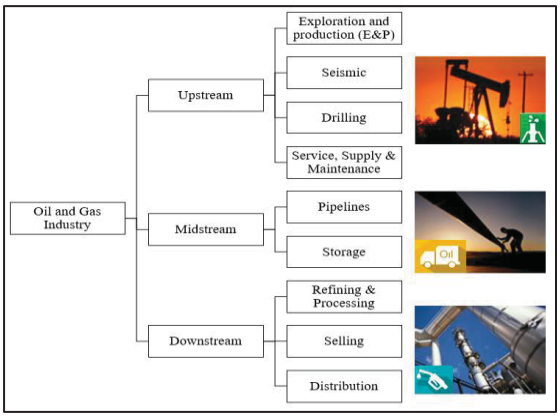


Fig. 1. Network petroleum supply chain sector

The petroleum supply chain starts with crude oil production provided to the refineries and petrochemical and then supplied worldwide [1]. In the past, supply chain planning models are developed and tested in real cases from a purely economic perspective and proposed different solutions to reduce costs and maximize the profit. Optimization of the petroleum organization profit is considered as one of the biggest challenges in supply chain management (SCM). SCM can generate a massive profit by providing the best design of the petroleum supply chain network. It is also important to notice that the petroleum sector suffers from a lack of management between parties and miss communication among the sectors (upstream, midstream, and downstream), stockholders, and suppliers [3]. Therefore, in this section, we will discuss the recent developments in supply chain planning and modeling in the petroleum sector and discuss the techniques and methods used to achieve more efficiency. Also, we focus on research studies with a broad perspective that looks to the integration of the different streams simultaneously.

2. MOTIVATION AND PROBLEM DESCRIPTION

Petroleum-producing countries, such as Libya, ranked in the top 20 in 2018 with a production of approximately 1,039 thousand barrels per day (bbl/d) [4], need to revise their supply chain strategy for production, refining, petrochemical, and transportation. Strategy development is so complex because several parameters have an impact on the decision-making process. It needs a long-term planning process and must consider the demand and price of different products and the capacity of the supply chain network. Moreover, for each stream in the petroleum supply chain, we have a possibility of instability in the international market for the demand and price

and possible production uncertainty related to the risk due to political issues. As a result, profitability and network capacity are not guaranteed and might lead to revenue losses. For instance, the Libyan production was high in 2010, with 1,802 thousand barrels per day. However, due to political issues and instability, the production is reduced by almost 42%, as shown in Fig 2.

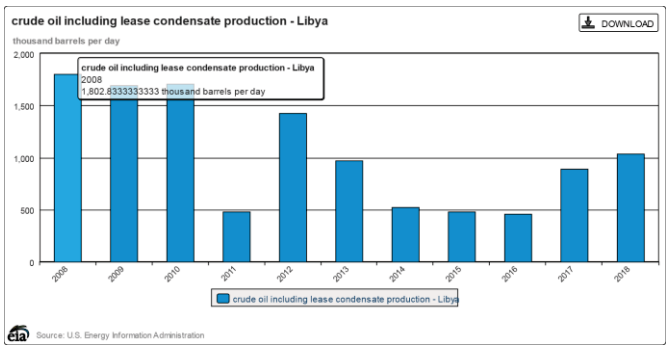


Fig. 2. Crude oil production from Libya.

Since demand is decreased and the cost of facilities operations is high, it is important to design the optimal network to efficiently adjust the production. So, the question here is how to help the decision-maker establish the best use of all the production facilities in the network to deliver the demand and respect the OPEC quota.

2.1 Problem description

In this paper, to build a model adapted to the reality of the petroleum supply chain, we consider an extended supply chain network to tackle the problem from the country-level perspective. In this section, the flowchart is shown in Figure. 3 illustrates the proposed model's processing stages for the Libyan petroleum sector supply chains at different levels.

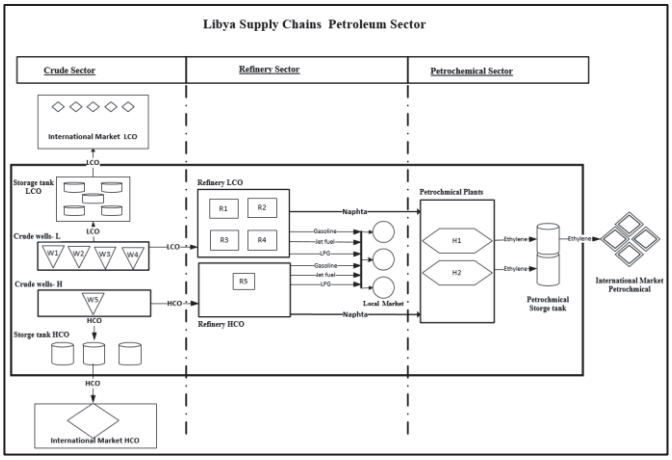


Fig.3. illustrates processing stages for the petroleum sector

The petroleum organization extracts the crude from several potential onshore and offshore wells. Four crude grades are produced (very Light, light, medium, and heavy) with different API numbers (American Petroleum Institute). The extracted crude is moved by using different transportation modes, mostly through pipelines, to the local refineries. Other crude oil types are exported to the international markets (European Union, Asia, and North America) through export terminals. At the refinery level, the main task is to transform the crude to the value products by various transformation technologies with a set of processing units. This study's main products are naphtha, kerosene, gas oil, asphalt, jet, diesel fuels, and lubricants. The refinery products might be either exported to market sources, used locally, or fed to local petrochemical. The petrochemical plants produce high-value products like ethylene, propylene, styrene, butadiene, and benzene. Finally, we consider that the planning horizon for the coming 20 years is divided into different periods of one year.

In this supply chain, several essential decisions must be made, including how much to extract, the flow of oil from wells to the refinery, and product shipment from the plant to the demand.

3. LITERATURE REVIEW

The area of petroleum supply chain management has become an interest for many researchers and practitioners, especially in economic analysis. The literature targets separately crude, refinery, and petrochemical supply chains using various methodologies [5]. Sahebi et al. (2014) developed a mathematical model for profit maximization by considering long-term strategic decisions [6]. The real case study results from the Persian Gulf shown that the technology selection for crude extraction influences the profit for a long-term horizon. In another study, some authors proposed a mathematical formulation and an optimization model for the production planning at the processing refinery units [7]. They showed that the integration between the production system and the refinery's utility system obtains the optimal unit operations and achieves an improvement in the overall profit. Hadidi et al. (2016) formulated an optimization model to identify the best technologies for pollution mitigation in petroleum refineries at the minimum cost [8]. Using a case study in Saudi Arabia refineries, gas emissions (Nitrogen oxides: NOx, Sulfur oxides: Sox, and volatile organic compounds: VOC) reduction was achieved and vary between 20% and 90%. Al-Sharrah et al. (2016) proposed and tested a linear programming model for the optimization of an entire petroleum organization (crude production, refineries, petrochemicals, and downstream) [9]. They used the model to measure the impact of the optimal production scenarios and improve economic performance.
Furthermore, Azadeh et al. (2017) presented an optimization planning model to study how the integration of upstream and midstream streams contributes to profit maximization [10]. The results show that reducing production costs and increasing production capacity have the same effects on the profit. Using a different case study, Ghaithan et al. (2017) develop a multi-objective optimization model to minimize the total cost, maximize the total revenue, and maximize the service level [11]. Lima et al. (2018) discussed the tactical planning of the downstream oil supply chain distribution problem of refined products and carried out an analysis related to petroleum price and demand uncertainties [12]. Moradinasab et al. (2018) develop a mixed-integer linear program model for the downstream oil supply chain and a game theory approach under three objective functions: minimize pollution, maximize the profit, and maximize job creation [13]. More recently, Attia et al. (2019) proposed a multi-objective tactical planning model to optimize the upstream oil and gas [14] simultaneously[14]. The model considers three objectives:

environmental impact, depletion of the natural resources, and minimizing cost and/or maximizing the revenue. The results showcase how the proposed model can support the decision-maker to make tradeoff analysis of different production plans subject to sustainability constraints. Finally, Al-Othman et al. (2008) developed a petroleum supply network model. They addressed the integration of all levels upstream, midstream, and downstream.

In summary, the literature review indicates that these models focus on separate streams in the petroleum sector and cannot support strategic planning optimization from the country level. An integrated model that include the different streams (upstream, midstream, and downstream) will help the decision-maker to plan the use of the different reserves of oil (wells) strategically and optimize the production plans for refineries and petrochemical plants at the country level to maximize the revenue from the whole petroleum industry sector. Therefore, in this work, we propose a novel and integrated planning model to optimize the petroleum supply chain at the country level. This work's main contribution is that it is the first study that includes the different streams together (crude, refinery, petrochemical, and transportation) in the same model. This developed model is applied for the first time to a real case study in Libya to analyze the petroleum sector from a supply chain perspective. Also, to show the improved model application, visualize and validate the results from the optimization model. We introduce a multi-period and multiproduct model, including several decisions (production, transportation, and distribution). A scenario-based analysis is conducted to evaluate the impact of uncertainty and risk events on the supply chain performance. The main objective is to identify the possible improvement of petroleum supply chain performance at the country level.

The remainder of this article is organized as follows. Section 2 presents the motivation and problem description. Also, the literature review will be presented in section 3. A simplified mathematical model and the data collected are introduced in section 4. Comprehensive analysis and some managerial insights are shown in section 5. Finally, a conclusion discusses the main results, and future research directions are presented in section 6.

4. MODEL DEVELOPMENT AND DATA COLLECTION

4.1. Model development

This section presents a deterministic mathematical model for optimizing the petroleum supply chain sector, including a list of sets, parameters, and continuous decision variables. Also, the proposed model includes all entities and their connections from oil wells to petrochemical plants.

4.2 Model Formulation

Sets

W: Set of crude oil wells $w \in \{1,2,...,\mathrm{W}\}$

P : Set of Crude oil products $p \in \{1,2,...,P\}$

J : Set of Crude oil Markets $j \in \{1,2,...J\}$

I : Set of Storage tanks for Crude oil

R : Set of Refineries $r \in \{1,2,...,\mathrm{R}\}$

E: Set of Refinery products $e \in \{1,2,...,E\}$

S: Set of Refinery Markets $s \in \{1,2,...,S\}$

H: Set of Petrochemicals plants $h \in \{1,2,...,H\}$

Z: Set of Petrochemicals Markets $z \in \{1,2,...,\mathrm{Z}\}$

N: Set of Petrochemicals products $n \in \{1,2,...,\mathrm{N}\}$

K: Storage tank for petrochemical products

T: Set of periods $t \in \{1,2,...,\mathrm{T}\}$

Crude oil related parameters

LC_{w}^{C} = Setup cost of location well $w \in W$ \$

PRC_{wpjt}^{C} = unit transportation cost of crude oil product $p \in P$ transported from well $w \in W$ to the crude market $j \in J$ t $t \in T$,(\$/bbl)

PRR_{wprt}^{C} = unit transportation cost of crude oil product $p \in P$ transported from well $w \in W$ to the refinery $r \in R$ at $t \in T$ (\$/bbl)

FCC_{pjt}^{C} = Unit selling price of crude oil $p \in P$ to market $j \in J$ at period $t \in T$ (\$/bbl)

EXC_{pwgt}^{C} = Variable extraction cost of one bbl of crude oil product $p \in P$ at wells $w \in W$ during period $t \in T$ (\$/bbl)

DC_{pjt}^{C} = Demand of crude oil product $p \in P$ by crude market $j \in J$ at period $t \in T$ (bbl/y)

$SC_{p}^{\max}$ = Overall storage capacity for crude oil product $p \in P$ (bbl/y)

$VC_{t}^{\max,\min}$ = Maximum and Minimum production level of crude oil production at the period $t \in T$ (bbl/y)

γ_{pj}^{C} =Yield of crude oil product $p \in P$ produce at well $w \in W$ from the market $j \in J$ (bbl)

Crude oil related continues decisions Variables

$XC_{p\mathrm{w}jt}^{C}$ = flow of crude oil product $p \in P$ transported from well $w \in W$ to market $j \in J$ during period $t \in T$ (bbl/y)

$XR_{p\mathrm{w}rt}^{C}$ = flow of crude oil product $p \in P$ transported from well $w \in W$ to refinery $r \in R$ during period $t \in T$,(bbl/y)

VC_{pwgt}^{C} = Extracted Quantity of crude oil product $p \in P$ at well $w \in W$ during period $t \in T$ (bbl/y)

$SC_{\mathrm{p}it}^{C}$ = Quantity of crude $p \in P$ kept in the storage tank $i \in I$ of crude at period $t \in T$ (bbl/y)

Crude oil related Binary decision variables

BW_{wt}^{C} = Binary variable takes a value of 1 if we locate well $w \in W$ at period $t \in T$, 0 otherwise

Refinery related parameters

CSR_{er}^{R} = Storage cost of product $e \in E$ at refinery $r \in R$,($/bbl)

CVR_{er}^{R} = Production cost of refinery product $e \in E$ from refinery $r \in R$, ($/bbl)

LR_{r}^{R} = Setup cost (fixed cost) of refinery location $r \in R$

$SR_{e}^{R,\max}$ = Overall storage capacity for a refinery, (bbl/y)

$PRIS_{rest}^{R}$ = Unit transportation cost of refinery product $e \in E$ transported from refinery $r \in R$ to market $s \in S$ at a period $t \in T$ ($/bbl)

$PRISH_{reht}^{R}$ = Unit transportation cost of refinery product $e \in E$ transported from refinery $r \in R$ to petrochemical plants $h \in H$ at period $t \in T$,($/bbl)

VTR_{ert}^{R} = Variable transformation cost of one bbl of product $e \in E$ at the refinery $r \in R$ at period $t \in T$,($/bbl)

CCR_{pr}^{R} = unit cost of processing crude product $p \in P$ ion refinery $r \in R$ ($/bbl)

DR_{est}^{R} =Demand of refinery product $e \in E$ by the market $s \in S$ at period $t \in T$,(bbl/y).

$FCR_{rt}^{\max}, FCR_{rt}^{\min}$ = Maximum and min production of crude mix to refinery $r \in R$ at period $t \in T$ (bbl/y)

$\varphi_{p,r}$ =Fraction of oil product $e \in E$ contributing to the crude blend of refinery $r \in R$ where $\sum \varphi_{i,r}$ =1

Refinery related continues decisions variables

XR_{resvt}^{R} = flow of refinery product $e \in E$ transported from refinery $r \in R$ to refinery market $s \in S$ by transportation mode $v \in V$ $t \in T$ (bbl/y).

XHR_{rehvt}^{R} = flow of refinery product $e \in E$ transported from refinery $r \in R$ to petrochemical plants $h \in H$ by transportation mode $v \in V$ during the period $t \in T$ (bbl/y)

SQR_{ret}^{R} = Quantity of product $e \in E$ kept in the storage tank at period $t \in T$ (bbl/y)

VR_{ert}^{R} = Production quantity of product $e \in E$ at the refinery $r \in R$ at the period $t \in T$ (bbl/y)

VH_{ert}^{R} = Quantity of refinery product $e \in E$ produced by refinery $r \in R$ and used as a feedstock to the petrochemical plants at the planning period t (bbl/y)

$VCCR_{prt}^{C}$ = Quantity of crude oil product $p \in P$ processed by refinery $r \in R$ at period $t \in T$ (bbl/y)

Refinery related binary decision variables

BR_{rt}^{R} = Binary variable takes a value of 1 if we decide to locate refinery $r \in R$ at period $t \in T$, 0 otherwise.

λ_{er} = Binary variable takes a value of 1 if product $e \in E$ by refinery $r \in R$ use as a feedstock to petrochemical plants, 0 otherwise

Petrochemical related Petrochemical parameters

LH_{h}^{H} = Setup cost of petrochemical plant Location $h \in H$

CSH_{nh}^{H} = Storage cost of Petrochemical products $n \in N$ at petrochemical plants $h \in H$ ($/bbl).

DH_{nzt}^{H} =Demand of the petrochemical product $n \in N$ by the petrochemical market $z \in Z$ at $t \in T$ (bbl/y)

FHH_{nzt}^{H} = Unit selling price of petrochemical product $n \in N$ to market $z \in Z$ at $t \in T$ ($/bbl)

$SH^{\max}$ = Overall storage capacity for petrochemical plants, (bbl/y)

$VH_{nht}^{\max}, VH_{nht}^{\min}$ = Maximum & Minimum production level of petrochemical product $n \in N$ at petrochemical plants $h \in H$ at $t \in T$ (bbl)

TRA_{nvt}^{H} = Unit transportation cost of petrochemical product $n \in N$ transported from petrochemical plants $h \in H$ to petrochemical Market $z \in Z$ at period $t \in T$ ($/bbl)

VTH_{nhgt}^{H} = Variable transformation cost of one bbl of product $n \in N$ in petrochemical plant $h \in H$ at $t \in T$ ($/bbl)

Petrochemical related continues decisions variables

XH_{nhzvt}^{H} = Flow of Petrochemical product $n \in N$ transported from petrochemical plants $h \in H$ to petrochemical market $z \in Z$ by transportation mode $v \in V$ during period $t \in T$ (bbl/y)

SQH_{hnt}^{H} = Quantity of petrochemical product $n \in N$ s kept in stock at the petrochemical plants $h \in H$ time period $t \in T$ (bbl/y)

VH_{hnt}^{H} = Production quantity of petrochemical product $n \in N$ at petrochemical plants $h \in H$ during period $t \in T$ (bbl/y)

Petrochemical related Binary decision variables

BH_{ht}^{H} = Binary variable takes a value of 1 if we decide to locate the petrochemical plant $h \in H$ at period $t \in T$,0 otherwise

Objective function

The objective function (Z) for the deterministic model is defined as the profit to maximize, which is equal to the total revenue minus the total costs, including (production, transportation, and storage cost) $/ bbl. The following equation expresses it, where Z^C, Z^R, Z^H are the profitability related to crude oil, refining, and petrochemical sectors, respectively.

$$Z = Z^C + Z^R + Z^H \quad (4.1)$$

$$Z^C = \sum_w \sum_p \sum_j \sum_t (XC^C_{wpjt} * FCC^C_{pjt}) - \sum_w \sum_t (LC^C_w * BW^C_{wt}) + \sum_w \sum_r \sum_v \sum_t (BTCR^C_{wrvt} * COCR^C_{wrvt}) + \sum_w \sum_j \sum_v \sum_t (BTC^C_{wjvt} * COC^C_{wjvt}) + \sum_w \sum_p \sum_t (EXC^C_{pwt} * VC^C_{wpt}) + \sum_w \sum_p \sum_t (CSC^C_{pw} * SC^C_{wpt})) \quad (4.2)$$

$$Z^R = \sum_t \sum_r \sum_v \sum_s ((XR^R_{erst} * FRR^R_{est}) - \sum_r \sum_t (LR^R_r * BR^R_{rt}) + \sum_r \sum_h \sum_v \sum_t (BTRH^R_{rhvt} * COHR^R_{rhvt}) + \sum_r \sum_s \sum_v \sum_t (BTR^R_{rsvt} * COR^R_{rsvt}) + \sum_r \sum_e \sum_t (TRAF^R_{ret} * VR^R_{ert})) \quad (4.3)$$

$$Z^H = \sum_h \sum_n \sum_z \sum_t (XH^H_{hnzt} * FHH^H_{nzt}) - \sum_h \sum_t (LH^H_h * BH^H_{ht}) + \sum_h \sum_n \sum_z \sum_t (XH^H_{hnzt} * FHH^H_{nzt}) + \sum_h \sum_z \sum_v \sum_t (BTH^H_{hzvt} * COH^H_{hzvt}) + \sum_h \sum_t (VH^H_{ht} * VTH^H_{ht}) + \sum_n \sum_h \sum_t (CSH^H_{nh} * SH^H_{hnt})) \quad (4.4)$$

Constraints

A set of constraints have proposed to determine the feasibility of the model. They are classified as four categories: material balance, demand balance, storage constraints, and production yield, they are presented next.

Crude demand satisfaction

$$DC^C_{pjt} = \sum_w XC^C_{pwjt}, \forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4.5)$$

Refinery demand satisfaction

$$DR^R_{est} = \sum_r XR^R_{rest}, \forall e \in E, \forall s \in S, \forall t \in T \quad (4.6)$$

Petrochemical demand satisfaction

$$DH^H_{nzt} = \sum_h XH^H_{hnzt}, \forall n \in N, \forall z \in Z, \forall t \in T \quad (4.7)$$

Materials balance for the crude oil sector

$$SC^C_{wpt} = SC^C_{wpt-1} + \sum_g VC^C_{wpt} - \sum_j XC^C_{wpjt} - \sum_r XRC^C_{wprt} \forall p \in P, \forall w \in W, \forall T > 1 \quad (4.8)$$

$$SC^C_{wp1} = SC^C_{wp1} + \sum_g VC^C_{wpg1} - \sum_j XC^C_{wpj1} - \sum_r XRC^C_{wpr1}, \forall p \in P, \forall w \in W \quad (4.9)$$

Materials balance for the refinery sector

$$SR^R_{ret} = SR^R_{ret-1+} \sum_w XRC^C_{wprt} - \sum_s XR^R_{rest} - \sum_h XHR^R_{reht}, \forall p \in P, \forall r \in R, \forall T > 1 \quad (4.10)$$

$$SR^R_{re1} = SR^R_{re1+} \sum_w XRC^C_{wpr1} - \sum_s XR^R_{res1} - \sum_h XHR^R_{reh1}, \forall p \in P, \forall r \in R \quad (4.11)$$

Materials balance for the petrochemical sector

$$SH^h_{hpt} = SH^h_{hpt-1} + \sum_r XHR^R_{hpzt} - \sum_z XH^H_{hpzt}, \forall n \in N, \forall h \in H, \forall T > 1 \quad (4.12)$$

Storage crude capacities

$$\sum_w \sum_p \sum_t SQC^C_{wpt} \le SC^{c\max}_p, \forall w \in W, p \in P, \forall t \in T \quad (4.13)$$

Storage refinery capacities

$$\sum_r \sum_e \sum_t SQR^R_{ret} \le SR^{R\max}_e, \forall r \in R, e \in E, \forall t \in T \quad (4.14)$$

Storage petrochemical capacities

$$\sum_h \sum_n \sum_t SQH^H_{hnt} \le SH^{h\max}_n, \forall n \in N, h \in H, \forall t \in T \quad (4.15)$$

Demand constraints, (4.5), (4.6), and (4.7) constraints show the upper and lower of crude oil demand for international markets, refinery for local market demand, and petrochemical products for the international market.

Material balance constraints: the sum of incoming flow must be equal outgoing flow through the network at any different sectors. Constraints (4.8), (4.9), (4.10), (4.11), and (4.12) represent the material balance for crude oil refinery and petrochemical, respectively.

Capacity constraints (4.13), (4.14), and (4.15) expresses the upper bound and lower bound for crude oil, refinery, and petrochemical storage capacity. In addition, there are three binary variables presented in this model. The first binary variables BW^C_{wt} which represent the location of the well in period t in the model. This variable takes value equal to 1 if we decide to locate new wells and 0 if not. The other binary variables for refinery BR^R_{rt} and petrochemical BH^H_{ht} as well.

4.3 Data collection

The Libyan petroleum supply chain network is composed of several Oil wells. The crude oil is extracted from five (5) onshore basins and two (2) offshore platforms. Two types of crude oil are produced (Low Crude Oil (LCO) and Heavy Crude Oil (LCO)) and transported via pipelines to feed the local refineries as well as storage tanks and exported to satisfy the international market as agreed in the OPEC quota. Furthermore, the supply chain contains five (5) refineries located in different regions with 380,000 bbl/day production capacity. Some of the refinery products (Gasoline, Naphtha, Jet fuel, and LPG) are used to satisfy the local demand. The remaining quantities are used as a feedstock for two (2) local petrochemical plants to produce Ethylene, Methanol, Ammonia, and Urea. The petrochemical products are used to satisfy the need of local industries and international demand [16].

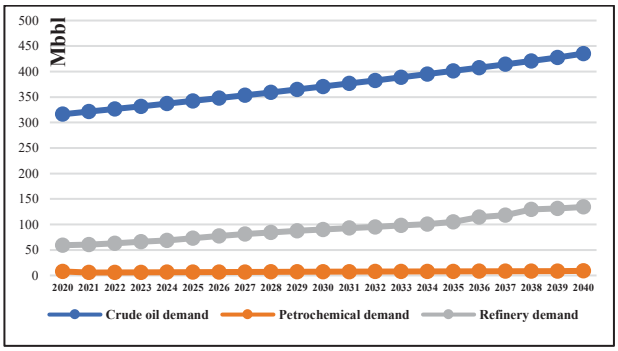


Fig. 4. Total aggregated demand per sector.

In this study, we consider the following scenario for demand in a million barrels (Mbbl) per year from the different sectors (crude oil, petrochemical products, and refinery products) during the next 20 years' time horizon as illustrated in Fig. 4. The forecast is produced based on the historical data and global oil and the global oil supply and demand Outlook [17]. Regarding market distribution, Fig. 5 illustrates the proportion of the local market versus the international market.

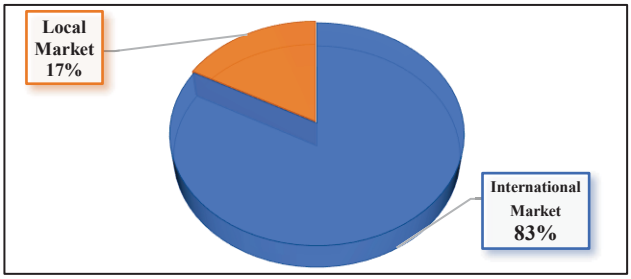


Fig. 5. International versus local market demands

Fig. 6 gives more details about the international crude oil market distribution by region. The European market is the most important one, followed by the USA and China. Finally, when we look to Fig. 7, the European region is the only customer for petrochemical production where the Netherlands is considered the most important country.

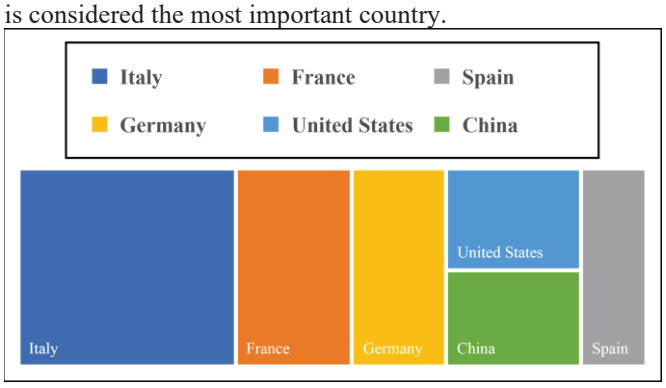


Fig. 6. Crude oil market distribution

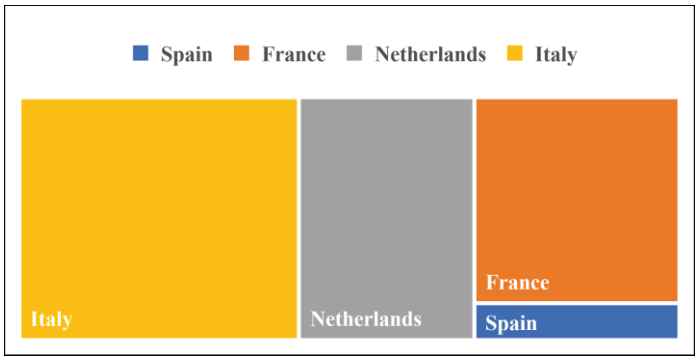


Fig. 7. Petrochemical market distribution

In the next section, we will present the main results and findings after using the proposed model combined with the collected data.

5. RESULTS AND ANALYSIS

Using a commercial software supply chain Guru (SCG), the model is implemented in less than one minute. The obtained model represents 5,340 variables, 400 integers, and 3,695 constrains. The model was validated first using the demand for 2019. After that, we analyze different scenarios. For this study, we will consider three scenarios. For the first one named the Baseline (scenario 1), which represents the optimal supply chain plan that results from using the deterministic model by considering all parameters, the actual rules and constraints described in section 3 are maintained. In the second scenario, we eliminate some rules and constraints to change some policies that have been applied in the previous years, which are not realistic in the future. Finally, in scenario 3, we consider the planning process under some risky events. The results for scenario 1 of the aggregated production for the 20 years horizon per product are illustrated in Fig. 8.

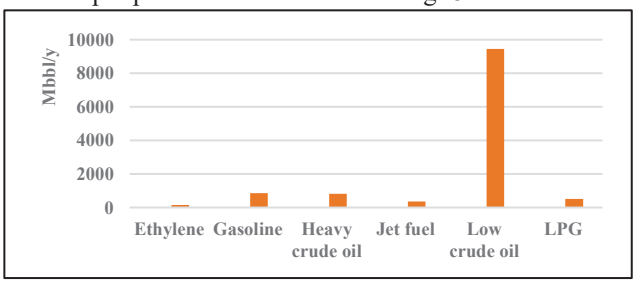


Fig. 8. Aggregated production quantities per product

Table 1 shows the detailed production quantities in Million bbl (Mbbl) and production and transportation costs in Million US dollars (M $) for each product in the different sectors. The production cost in the crude sector is the most dominating cost. The crude production cost is nearly 86% of the total cost while refining 8% and petrochemical 6%. Also, transportation cost has a majority in the crude sector 84% and 4% in the refinery.

Table. 1. Production and transportation cost for scenario 1

Products	Production Cost (M $)	Transportation Cost (M $)	Quantity (Mbbl)	Average cost ($)
LCO	112,605	17,506	9,457	13.76
HCO	9,783	2,038	815	14.50
Gasoline	11,104	1,708	854	15
Jet fuel	1,843	737	369	7

LPG	2,860	1,005	502	7.69
Ethylene	9,953	386	154	67

Regarding demand satisfaction, customer flows are illustrated in Fig. 9. We noted that the crude oil shipments satisfy all demands.

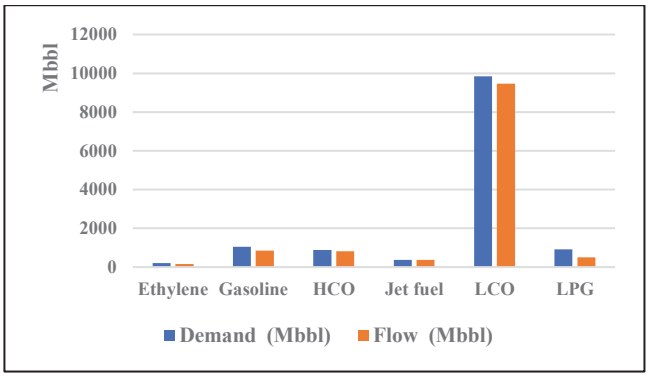


Figure. 9. Demand vs. to flow for different products

Tables 2 illustrate the profit and service level, which can be calculated by the variation between flow and demand. We focused on scenario one Baseline to see how the cost is reduced for transportation and production. Because all the wells in the Baseline are used, but in scenario 2, some wells (W1, W3, and W4) are not used because the production cost is expensive.

Table 2. Profit and Service level for scenario 1.

Products	Demand (Mbbl)	Flow (Mbbl)	Profit (M$)	Service level
LCO	9,848	9,457	360,054	96%
HCO	886	815	37,094	92%
Gasoline	1,042	854	81,147	82%
Jet fuel	380	369	26,171	97%
LPG	922	502	41,342	55%
Ethylene	205	154	12,808	75%

The actual capacity and policy rules are not synchronized with future demand. Therefore, it is essential to analyze and implement new rules at the country level to maximize profit and increase the service level. In scenario 2, we exclude some of the production constraints included in the baseline scenario to guarantee each well's minimum production level. In the third scenario, we test the network to simulate the production interruption in the risky well 2. This scenario has decrease service level but increases the profit.

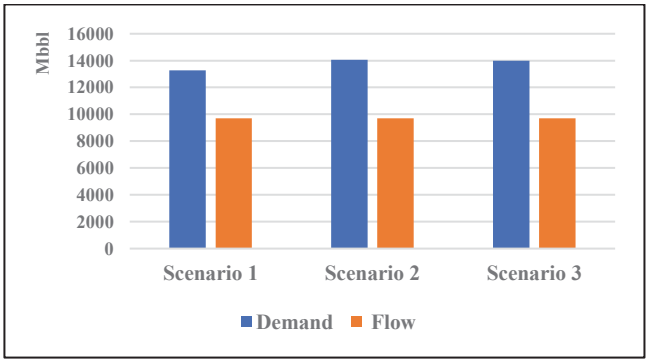


Figure. 10. show production quantity for the petroleum sector

Table 3. Demand, flow profit, and service level in diff scenarios

Scenarios	Demand (Mbbl)	Flow (Mbbl)	Profit (M $)	Service level
Scenario 1	13,281	9,697	558,616	73%
Scenario 2	14,053	9,697	600,271	69%
Scenario 3	13,980	9,697	601,198	69.3%

The results are illustrated in Table 4 to compare two scenarios (10% increase, 10% decrease in market demand), which shows that the profitability in scenario 1 is more increased by 63% concerning the base case scenario. This represents a case of higher crude oil sales revenues (compared with the base case). However, scenario 2 resulted in a decrease in profitability due to reducing their crude oil production level because it is the most products that have more priority to generate high profits. As a result, we need to establish the best strategy for two scenarios (1,2) to face the change of the production level variation for each product to still get the maximum profit.

Table. 4. The difference between scenario 2 and 3

Scenarios	Products	Profit (M $)	Profit increase/decrease
Scenario + 10%	Ethylene	14,089	10%
	Gasoline	89,262	10%
	HCO	4,0804	10%
	Jet fuel	29,086	10%
	LCO	407,320	13.13%
	LPG	46,363	9.97%
	Total	***626,924***	***12.23%***
Scenario -10%	Ethylene	11,528	-10%
	Gasoline	73,033	-10%
	HCO	33,385	-10%
	Jet fuel	23,798	-10%
	LCO	256,486	-13.13%
	LPG	37,961	-9.97%
	Total	***492,492***	***-11.84%***

6. CONCLUSIONS

This paper aimed to develop an optimization model for supply chain planning in the petroleum industry, which accounts for economic performance. The considered decisions are related to the flow between nodes, production capacities, and satisfy the demand from the country-level perspective to maximize the profit from local and international markets. We examined the model performance through the Libyan case study's real data with the time horizon analyzed and covers 20 years. From the case-study analysis, we can conclude that the generic mathematical model allows improvements in the economic side as a first step and offers essential managerial insights. Finally, future work should include environmental and social problems as the second step to establish a strategic plan for solving problems related to the sustainability dimensions.

7. REFERENCES

[1] R. Al-Husain, T. Assavapokee, and B. Khumawala, *Supply Chain Management in the Petroleum Industry: Challenges and Opportunities*. 2006, pp. 90-97.

[2] BP., "BP statistical review of world energy 2018," 2013.

[3] W. B. E. Al-Othman, H. M. S. Lababidi, I. M. Alatiqi, and K. Al-Shayji, "Supply chain optimization of petroleum organization under uncertainty in market demands and prices," *European Journal of Operational Research,* vol. 189, no. 3, pp. 822-840, 2008/09/16/ 2008.

[4] U.S Enegry Information Administration. (2019, December 17). *International Energy Statistics* Available: https://www.eia.gov/beta/international/rankings/#?cy=2017

[5] H. Sahebi, S. Nickel, and J. Ashayeri, "Strategic and tactical mathematical programming models within the crude oil supply chain context—A review," *Computers & Chemical Engineering,* vol. 68, pp. 56-77, 2014/09/04/ 2014.

[6] H. Sahebi, S. Nickel, and J. Ashayeri, "Environmentally Conscious Design of Upstream Crude Oil Supply Chain," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 53, no. 28, pp. 11501-11511, 2014/07/16 2014.

[7] H. Zhao, G. Rong, and Y. Feng, "Multiperiod planning model for integrated optimization of a refinery production and utility system," *Industrial & Engineering Chemistry Research,* vol. 53, no. 41, pp. 16107-16122, 2014.

[8] L. A. Hadidi, A. S. AlDosary, A. K. Al-Matar, and O. A. Mudallah, "An optimization model to improve gas emission mitigation in oil refineries," *Journal of cleaner production,* vol. 118, pp. 29-36, 2016.

[9] G. Al-Sharrah, H. M. Lababidi, and Y. I. Ali, "Planning a Supply Chain with Risk and Environmental Objectives," *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering,* vol. 10, no. 8, pp. 2679-2683, 2016.

[10] A. Azadeh, F. Shafiee, R. Yazdanparast, J. Heydari, and A. M. Fathabad, "Evolutionary multi-objective optimization of environmental indicators of integrated crude oil supply chain under uncertainty," *Journal of Cleaner Production,* vol. 152, pp. 295-311, 2017/05/20/ 2017.

[11] A. M. Ghaithan, A. Attia, and S. O. Duffuaa, "Multi-objective optimization model for a downstream oil and gas supply chain," *Applied Mathematical Modelling,* vol. 52, pp. 689-708, 2017.

[12] C. Lima, S. Relvas, and A. Barbosa-Povoa, "Stochastic programming approach for the optimal tactical planning of the downstream oil supply chain," *Computers & Chemical Engineering,* vol. 108, pp. 314-336, 2018.

[13] N. Moradinasab, M. R. Amin-Naseri, T. J. Behbahani, and H. Jafarzadeh, "Competition and cooperation between supply chains in multi-objective petroleum green supply chain: A game theoretic approach," *Journal of Cleaner Production,* vol. 170, pp. 818-841, 2018/01/01/ 2018.

[14] A. M. Attia, A. M. Ghaithan, and S. O. Duffuaa, "A Multi-Objective Optimization Model for Tactical Planning of Upstream Oil & Gas Supply Chains," *Computers & Chemical Engineering,* 2019.

[15] W. B. Al-Othman, H. M. Lababidi, I. M. Alatiqi, and K. Al-Shayji, "Supply chain optimization of petroleum organization under uncertainty in market demands and prices," *European Journal of Operational Research,* vol. 189, no. 3, pp. 822-840, 2008.

[16] P. Barker and K. McLachlan, "Development of the Libyan oil industry," in *Libya Since Independence (RLE Economy of Middle East)*: Routledge, 2014, pp. 49-66.

[17] A. Sieminski, "International energy outlook," *Energy Information Administration (EIA),* vol. 18, 2014.

ECONOMIC ASSESSMENT OF RAMP-UP STRATEGIES IN MULTI-VARIANT PRODUCTION

Antoine PIERNÉ[1], Khaled MEDINI[2]

[1] Mines Saint-Etienne, Saint-Etienne, France. antoine.pierne@etu.emse.fr
[2] Mines Saint-Etienne, Univ Clermont Auvergne, CNRS, UMR 6158 LIMOS, Henri Fayol Institute, F - 42023 Saint-Etienne France. khaled.medini@emse.fr

Malek MASMOUDI[3]

[3] Faculty of Sciences and Techniques, University of Lyon, University Jean Monnet Saint-Etienne, 42000, Saint-Etienne, France malek.masmoudi@univ-st-etienne.fr

ABSTRACT: *Increasing market share or entering new markets is a challenge for manufacturing and service companies alike. High uncertainty and lack of process knowledge are among the most challenging factors. This is particularly true in multi-variant production which is potentially characterized by more complex decisions depending on the variety level of the offering, which leads naturally to higher operations complexity. Ramp-up phase is the heart of these challenges since a proper management of production ramp-up leads to successful product or service introduction into the market. This paper addresses the lack of proper decision supporting tools to enlighten decision makers in ramp-up phase, particularly with regard to economic performance.*

KEYWORDS: *Production, Ramp-up, Costing, Learning.*

1 INTRODUCTION

Launching a new product is generally challenged with the lack of process knowledge, leading to higher uncertainty. This is typically one characteristic of the ramp-up phase, which begins when production steps and product composition are fixed and finishes when a firm reaches the level of production targeted (see Figure 1). During the ramp-up, manufacturers and workers learn and improve their skills [9] [12]. Because of the uncertainty, it is difficult for a company to plan the production cost and the investment needed to reach the level of production targeted. Moreover, it is difficult to price an article before the end of the ramp-up phase. In addition, the decision maker must choose between different ramp-up strategies integrating learning in investment and production cost calculation. This paper deals with these issues through a costing model for assessing ramp-up management strategies in multi-variant production while integrating learning effects.

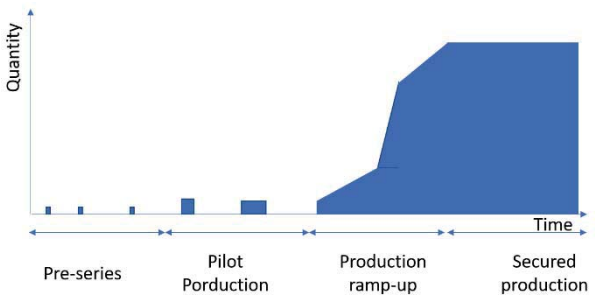


Figure 1: the Ramp-up phase

The rest of the paper is organised as follows. Section 2 provides a brief literature review about costing, ramp-up management and learning effects. Section 3 describes the proposed model for economically assessing production ramp-up strategies. Section 4 reports on the experimentation in multi-variant production context and discusses the results. Section 5 provides conclusions and perspectives.

2 STATE OF THE ART

This section provides a brief overview of common ramp-up strategies in multi-variant production, the learning effects in ramp-up and costing models to ensure economically efficient ramp-up management.

In fact, in a ramp-up context, the greater the variety of products, the greater the number of possible strategies [13]. For instance, Slamaning and Winckler [11] presented two different approaches to ramping-up. The first one consists in producing all kind of products simultaneously, and the second one consists in launching the production of one kind of article at a time. These two strategies will be explored further in the experimentation section of this paper.

During the ramp-up phase, several factors are continuously evolving, including operators' knowledge [17]. The construction of more adaptive machines and plants enables industrials to consider a perpetual renewal of the products' ranges sold. Operators are therefore required to constantly learn. Lanza and Sauer [10] show different possible evolutions of the knowledge of the operators that are generally not linear. For example, at the beginning, the level of knowledge increases rapidly, and

the learning speed decreases with time. To master the level of knowledge evolution is a key factor to succeed the ramp-up phase [3][18] and plays a major role in the context of increased product variety [20]. Learning is even seen as a major challenge for tomorrow's industry [1][16].

The Wright adapted model [22][23] can be used to model the decrease of the time needed to execute a task. Denote Δ_n the time needed to fabric the n-product, Δ_1 the time needed to fabric the first article and Δ_{min} the minimal duration needed to fabric the product :

$$\Delta_n = (\Delta_1 - \Delta_{min}) \times n^{-\alpha} + \Delta_{min} \quad (1)$$

Where α is a coefficient.

In a context of high variety, decision makers must seek the best strategy to achieve the desired level of production in the most profitable way [8]. There are two types of methods to estimate the economies of scale achieved in a ramp-up phase.

- The first type consists in starting from a given level of production and estimating a coefficient that would make it possible to calculate production costs on a larger scale. The most popular coefficient method is the "0.6 rule" method. Tribe and Alpine [5] show the limitations of this method and highlights how difficult it is to predict the coefficient that links two different scales of production.
- The second type consists in iterating a classical costing method at several production levels. Among the classical costing methods, two families can be distinguished: micro-costing and gross-costing and are explained below.

Gross-costing methods [2] are based on aggregated data and overall costs. These methods can have several advantages, particularly when manufacturing processes are stable, and costs do not change much. These methods generally require little technical data and are based on financial data.

Micro-costing models [2][19] are more difficult to implement, without necessarily implying a more accurate overall result. Micro-costing methods are based on technical processes and consist in breaking down the process and defining the cost of each stage of the process. These micro-costing methods are increasingly used, particularly in the current context where companies are outsourcing parts of their manufacturing process [19]. The use of these methods is now possible in manufacturing industries thanks to the large amount of data available.

In 2000, L. Rosenberg and al. [21] used a parametric model to evaluate the cost of a space mission. Their model can be qualified as a gross costing method because it uses financial data.

In this article we try to build a micro-costing parametric model to evaluate production cost. Instead of starting from the final cost and decompose it, we build the parametric model from the bottom.

Our strategy is to list the parameters who should influence the cost and then we build equation with all the parameters.

3 RUMP-UP MICRO COSTING MODEL

We assume that a company wants to produce a set $\mathcal{A}$ of new products. The decision maker wants to know how to launch the production of those articles in order to maximize its benefits during the N following periods i.e. $\mathcal{T} = \{t_1, \dots, t_N\}$.

Decision makers must decide how many articles a to produce at period t and how to produce them i.e. decide the production strategy. Let denote n_a^t the quantity of articles a to produce at period t and M_a^t the set of machines to be used for the production.

We assume that the production cannot be kept in stock and that all the production is sold i.e. the value n_a^t also represents the amount of article a sold at period t.

We assume that before starting the ramp-up phase, the company selects a set of machines $\mathcal{M}$ to be used for the production. For all machines $m \in \mathcal{M}$, the following information is necessary:

- purchasing costs: c_m
- maintenance costs per period: l_m
- capacity in minutes: k_m^t
- processing time per article a : PT_a^m
- binary variable: $\delta_m = 0$ if the machine is automated, $\delta_m = 1$ else.
- Operator wage on the machine m for one period: w_m
- salvage value s_m
- useful time life T_m

To evaluate the necessary ramp-up investment we must determine the number of machines to be used at period t. We introduce the function ϕ, such as $\phi(m, M_a^t) = 1$ if the machine $m \in M_a^t$, 0 else.

Denote N_m^t the number of machines m necessary at the period t to produce the quantities n_a^t for each article a.

$$N_m^t = \left\lceil \frac{\sum_{a \in \mathcal{A}} PT_a^m \times n_a^t \phi(M_a^t, m)}{k_m^t} \right\rceil \quad (2)$$

In this equation, the numerator represents the total workload, and the denominator represents the capacity.

Denote I_m^t the total investment needed in equipment m at period t:

$$I_m^t = c_m \left(max_{t_0 \le t}\left(N_m^{t_0}\right) - max_{t_0 \le t-1}\left(N_m^{t_0}\right) \right) \quad (3)$$

To evaluate the cost of the investment at period t, the real investment must be amortized. Denote D_m^t the depreciation cost for equipment type m at period t.

$$D_m^t = \sum_{\tau=max(1,t-T_m)}^{t} \frac{I_m^{\tau}(c_m - s_m)}{T_m c_m} \quad (4)$$

Denote E_m^t the total cost of equipment m at period t:

$$E_m^t = D_m^t + N_m^t l_m \quad (5)$$

We assume that if the equipment is not automatized, there is a labour cost L_m^t, which is the cost of the workforce needed to use the machines m at period t.

$$L_m^t = \delta_m N_m^t w_m \quad (6)$$

Moreover, to produce an article a, the company needs components and raw materials. Denote $\mathcal{B}$ the set of raw materials and components that are used by the company to produce the set of articles $\mathcal{A}$. And for each article a, denote q_a^b the quantity of component b needed to produce the article a. Denote C_a^t the components' (and raw material) cost of production of the article a at period t.

$$C_a^t = \sum_{b\in\mathcal{B}} n_a^t \, q_a^b f_b(n_a^t q_a^b) \quad (7)$$

f_b is a function that gives the unitary cost of the material b depending on the quantity of material b bought.

Here we assume that materials are not kept in stock.

Thanks to all this data (which are available for a manufacturer) it is possible to evaluate the total cost of producing at period t:

$$Z^t = \sum_{m\in\mathcal{M}} (E_m^t + L_m^t) + \sum_{a\in\mathcal{A}} C_a^t \quad (8)$$

During the ramp-up phase, the company learns about the production process. The reject rate decreases, and machines capacity increase.

We use a Wright [23] based equation to model the learning effect. Denote β the ratio between the duration of a process steep for the first product and the duration of a process steep when the level of knowledge is maximal. The Wright equation (1) is now:

$$\frac{\Delta_t}{\Delta_{min}} = \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_{min}} - 1\right) t^{\alpha} + 1 = (\beta - 1)t^{-\alpha} + 1 \quad (9)$$

We model the level of knowledge with the following function:

$$s(t) = \frac{1}{(\beta-1)t^{-\alpha}+1} \quad (10)$$

If s is close to 1, it means that the level of knowledge is close to 100%.

With $\alpha = 1{,}25$ and $\beta = 3$ the knowledge function is as follow:

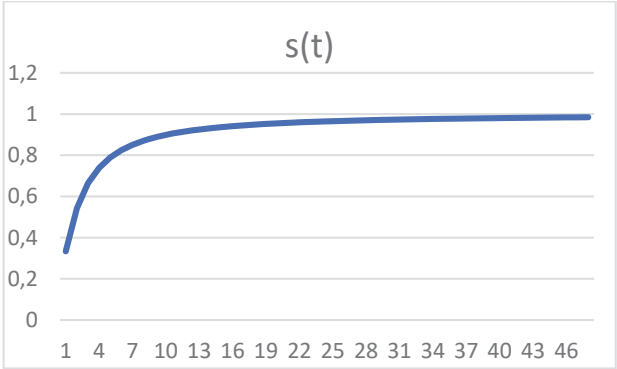


Figure 2 : Evolution of knowledge level

The function s is used to model the evolution of the capacity of machines. For each machine, the machine's constructor announces a maximal capacity K_m^0. The capacity level of a machine m at period t is given by the following relation:

$$k_m^t = K_m^0 s(t) \quad (11)$$

The function s is also used to model the evolution of the reject rate of an article a. Denote r_a^t the reject rate of the article a:

$$r_a^t = 1 - s(t) \quad (12)$$

The introduction of a reject rate implies the evolution of equation (7):

$$C_a^t = \sum_{b\in\mathcal{B}} \frac{n_a^t q_a^b}{1-r_a^t} f_b\left(\frac{n_a^t q_a^b}{1-r_a^t}\right) \quad (13)$$

To evaluate a strategy, we must define S^t the revenues of the company at period t. For each article $a \in \mathcal{A}$, denote p_a the selling price of the article a.

$$S^t = \sum_{a\in\mathcal{A}} n_a^t \, p_a \quad (14)$$

For each period, we can define G^t the amount of money earned at period t. Denote i the monthly inflation rate:

$$G^t = \frac{S^t - Z^t}{(1+i)^t} \quad (15)$$

We define a strategy X where $X = \{n_a^t, t \in \mathcal{T}, a \in \mathcal{A}\} \cup \{M_a^t, t \in \mathcal{T}, a \in \mathcal{A}\}$. X can be interpreted as a set of decision variables. The goal of a decision maker is to find X such as $\mathcal{G}(X)$ is maximal.

4 EXPERIMENTATION : REAL CASE STUDY

The aim of the experimentation is to illustrate the model applicability in multi-variant production context. Several hypotheses are made to make the example readable and to focus on the comparative analysis of the two ramp-up strategies.

The example involves keyrings production and is taken from the *IT'm Factory*, which is a demonstration platform for Industry 4.0 located at Mines Saint-Etienne. The basic idea is to investigates possible strategies for introducing five variants from the keyring into the market.

Table 1 Description of an article

Article	Description
a_1	Purple paste key ring
a_2	Blue paste key ring
a_3	Luxury purple paste key ring
a_4	Plastic key ring
a_5	Luxury plastic key ring

For each article, the selling price and the demand are known (see Table2).

Table 2 Information about an article

Article	Selling price (€)	Demand function
a_1	10	d_1
a_2	10	d_2
a_3	14	d_3
a_4	8	d_4
a_5	12	d_5

The demand functions are defined as follow:

$$d_1(t) = \begin{cases} 100t \text{ if } t < 25 \\ 2400 \text{ else} \end{cases} \quad (16)$$

$$d_2(t) = \begin{cases} 2500\left(1 - e^{\frac{-2t}{24}}\right) \text{ if } t < 25 \\ 2200 \text{ else} \end{cases} \quad (17)$$

$$d_3(t) = 1500 \quad (18)$$

$$d_4(t) = \begin{cases} -11t^2 + 350t + 200 \text{ if } t < 25 \\ 2300 \text{ else} \end{cases} \quad (19)$$

$$d_5(t) = \begin{cases} 500 \text{ if } t \leq 6 \\ 2000 \text{ if } 7 \leq t \leq 12 \\ 2500 \text{ if } 13 \leq t \leq 18 \\ 1800 \text{ else} \end{cases} \quad (20)$$

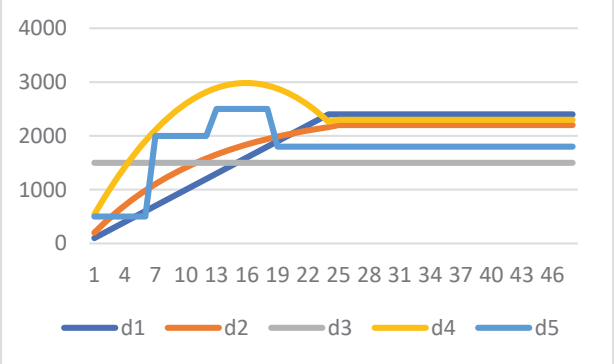


Figure 3. Demand evolution

In order to produce five articles, components and raw materials are used as shown in Table 3.

Table 3 Information about component and raw materials.

Component	Description	Unitary cost function
b_1	Grey paste	f_1
b_2	Purple paste	f_2
b_3	Blue paste	f_3
b_4	Plastic	f_4
b_5	Ring	f_5
b_6	Ring-luxury	f_6
b_7	Water	f_7

The unitary cost functions are defined as follow:

$f_1(q) = 8$ if $q \leq 100, f_1(q) = 7$ else (21)

$f_2(q) = 8$ if $q \leq 100, f_1(q) = 7$ else (22)

$f_3(q) = 10$ if $q \leq 100, f_1(q) = 9$ else (23)

$f_4(q) = 7$ if $q \leq 100, f_1(q) = 6$ else (24)

$f_5(q) = 0.5$ (25)

$f_6(q) = 1.5$ (26)

$f_7(q) = 0.01$ (27)

For each article a, the matrix represented in Table 4, gives the quantity q_a^b of material b needed.

Table 4 Material consumption

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
b_1	0.01	0.01	0.01		
b_2	0.01		0.01		
b_3		0.01			
b_4				0.012	0.012
b_5	1	1		1	
b_6			1		1
b_7	0.001	0.001	0.001		

For example, 0.01 unit of component $b_1$is needed to produce one unit of article a_1.

The five articles are produced using the machines shown in Table 5.

Table 5 Machine's data

m	c_m(€)	l_m (€)	K_m^0 (minutes)	δ_m
m_1	5 000	50	9 600	1
m_2	7 500	100	3 200	1
m_3	10 000	100	4 800	1
m_4	7 500	200	3 200	1
m_5	10 000	200	1 600	1
m_6	12 500	100	3 200	1
m_7	5 000	50	3 200	1

For example, machine m_1 costs 5000 € and requires a maintenance investment of 50 € per period. The maximal capacity of m_1 is 9 600 minutes per period and the machine is not automated, an operator is needed.

For all the machines, $\boldsymbol{T_m = 36}$ months, $\boldsymbol{w_m = 2000}$ € and $\boldsymbol{s_m = 0.2c_m}$. The processing time $\boldsymbol{PT_a^m}$ is approximately 1 minute for all articles.

A decision maker wants to compare two ramp-up strategies which are planned for 24 months ($t_N = 24$). The first one consists in producing all kind of products simultaneously, and the second strategy consists in launching the production of one kind of article at a time. Let denote $n_{a,i}^t$ the quantity of articles a produced at period t with the strategy i. With the first strategy, the quantity to produce is given by the following formula:

$$n_{a_j,1}^t = min\left(d_j(t), 1175\left(1 - e^{\frac{-t}{12}}\right)\right) \quad (28)$$

For the second strategy, at the beginning only one article is produced and regularly (every 5 periods), a new article is launched. Articles are considered in the arbitrary order of 1 to 5. Here are the auxiliary functions considered for the production:

$$y_1(t) = \begin{cases} 300t \text{ if } t \leq 5 \\ 1500 \text{ else} \end{cases} \quad (29)$$

$$y_2(t) = \begin{cases} 0 \text{ if } t \leq 5 \\ 300(t-5) \text{ if } 6 \leq t \leq 10 \\ 1500 \; else \end{cases} \quad (30)$$

$$y_3(t) = \begin{cases} 0 \text{ if } t \leq 10 \\ 300(t-10) \text{ if } 11 \leq t \leq 15 \\ 1500 \; else \end{cases} \quad (31)$$

$$y_4(t) = \begin{cases} 0 \text{ if } t \leq 15 \\ 300(t-15) \text{ if } 16 \leq t \leq 20 \\ 1500 \; else \end{cases} \quad (32)$$

$$y_5(t) = \begin{cases} 0 \text{ if } t \leq 20 \\ 300(t-20) \text{ if } 21 \leq t \leq 24 \\ 1500 \; else \end{cases} \quad (33)$$

Thanks to those auxiliary functions, we define the quantities produced with the second strategy:

$$n_{a_j,2}^t = \min\left(d_j(t), y_j(t)\right) \quad (34)$$

Figure 4 and Figure 5 show the curves of quantities produced for strategy 1 and 2, respectively.

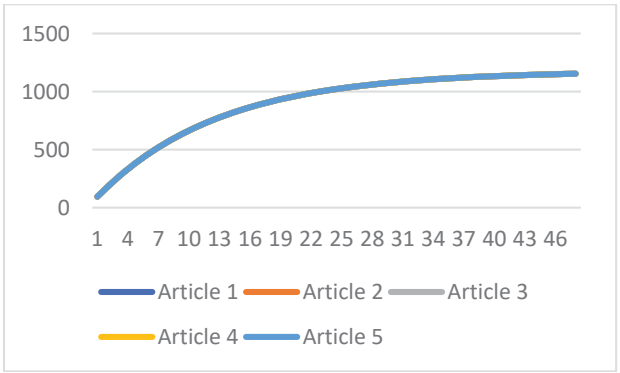


Figure 4. Quantity produced depending on the period with the first strategy

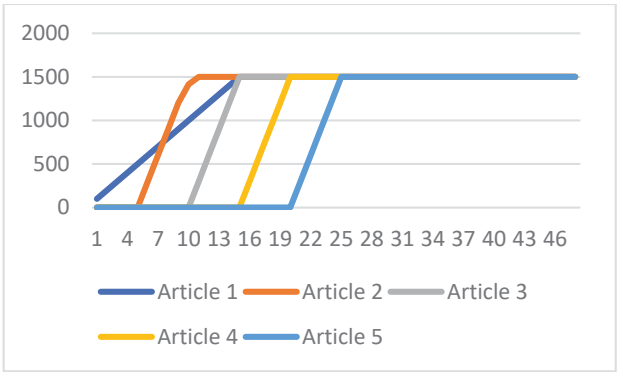


Figure 5. Quantity produced depending on the period with the second strategy

For the two strategies, we used the same set of machines. The following matrix enables to know which machine can be used to produce an article. i.e. 1 if the machine can be used, 0 else.

Table 6 Machine usability matrix

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
m_1	1	1	1	0	0
m_2	1	1	1	0	0
m_3	0	0	0	1	1
m_4	1	1	1	1	1
m_5	1	1	1	1	1
m_6	1	1	1	0	0
m_7	1	1	1	1	1

Considering the information above and the investment capacity, the decision maker can choose the ramp-up strategy, based on indicators, such as the time until return on investment and the final gain.

We take $\alpha = 1{,}25$ and $\beta = 3$ for the learning curve parameters.

With a monthly inflation rate $i = 0{,}00165$, we obtain the following results.

Tables 7 shows the numerical results related to profit evolutions, for the two strategies.

Table 7 Profit per period

Period	Strategy 1	Strategy 2
1	-12 383	-12 800
2	-9 678	-11 848
3	-18 166	-23 658
4	-11 871	-21 763
5	-17 082	-32 591
6	-7 811	-26 994
7	-10 260	-34 091
8	-5 384	-27 219
9	-5 520	-30 616
10	1 494	-21 763
11	3 314	-19 745
12	12 061	-16 966

13	15 530	-10 425
14	25 756	-3 140
15	30 573	5 516
16	42 023	12 656
17	47 985	23 422
18	58 060	32 668
19	64 969	45 521
20	75 929	56 853
21	83 587	65 929
22	95 280	80 204
23	103 585	92 220
24	115 817	109 407
25	124 670	124 333
26	132 937	141 411
27	142 247	156 235
28	150 923	173 203
29	160 591	187 925
30	169 580	204 784
31	179 555	219 404
32	188 806	236 155
33	198 993	250 674
34	208 459	267 317
35	218 855	281 736
36	228486	298 272
37	240 246	313 584
38	250 200	330 011
39	262 068	345 219
40	272 135	361 539
41	284 063	376 643
42	294 169	392 855
43	306 184	407 856
44	316 801	424 167
45	328 847	439 065
46	339 481	455 270
47	351 538	470 065
48	362 188	487 035

Figure 6 show the profit evolution (in €) with the two strategies (derived from table 7).

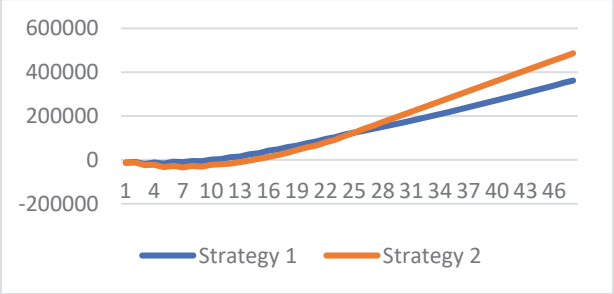


Figure 6. Profit evolution with the two strategies

Based on this comparison, if the decision maker wants to achieve a quick return on investment, strategy 1 is preferred, and if he wants to maximize the total profit, strategy 2 is preferred.

5 CONCLUSION AND PERSPECTIVES

This paper provided a model for a manufacturer to cost production during ramp-up phase. The provided model allows to easily define an objective function for strategy evaluation e.g. the total gain or the time until profit. A case study is considered for illustration.

To go further, this model is to be improved, by adding a larger choice of machines. Once the objective function is calculated, real constraints will be considered as well as the investment capacity and the machines availabilities. So far, the model set a foundation for further development which consider the optimization.

AKNOWELDGEMENTS

The research is partly supported by Région Auvergne Rhône Alpes (AURA) through VARIETY project.

REFERENCES

[1] Doltsinis S., Ferreira P., Mabkhot M., Lohse N, 2020. A Decision Support System for rapid ramp-up of industry 4.0 enabled production systems. Computers in Industry, 116.

[2] Morelle M., Plantier M., Dervaux B., Pagès A., Deniès F., Havet N., Perrier L., 2018. Méthodes d'analyse et de traitement des données de coût : approches par « micro-costing » et « gross-costing ». Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique, 66 (2), 101-118

[3] Schmitt R., Heine I., Jiang R., Giedziella F., Basse F., Voet H., Lu S., 2018. On the future of ramp-up management. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 23, 217-225

[4] Colosimo B. M., Cavalli S., Grasso M., 2019. A cost model for the economic evaluation of in-situ monitoring tools in metal additive manufacturing. International Journal of Production Economics, 223.

[5] Tribe M. A., Alpine R. L. W., 1986. Scale economies and the "0.6 rule". Engineering Costs and Production Economics, 10 (1), 271-278

[6] Krishnan, A. (2007). An Application of Activity Based Costing in Higher Learning Institution: A Local Case Study. Contemporary Management Research, 2(2), 75.

[7] Almeida A., Cunha J., 2017. The implementation of an Activity-Based Costing (ABC) system in a manufacturing company. Procedia Manufacturing, 13, 932-939

[8] Wochner S., Grunow M., Staeblein T., Stolletz R., 2016. Planning for ramp-ups and new product introductions in the automotive industry: Extending sales and operation planning. International Journal of Production Economics, 182, 372-383

[9] Ball P. D., Roberts S., Natalicchio A., Scorzafave C., 2011. Modelling production ramp-up of engineering products. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 225(6), 959-971.

[10] Lanza, G., Sauer, A., 2012. Simulation of personnel requirements during production ramp-up. Prod. Eng. 6, 395-402.

[11] Slamanig, M., Winkler, H., 2011. An exploration of ramp-up strategies in the area of mass customisation. Int. J. Mass Cust. 4, 22-43.

[12] Elstner, S., Krause, D., 2013. From product development to market introduction: A co-citation analysis in the field of ramp-up. Proc. Int. Conf. Eng. Des. ICED 1 DS75-01, 289-298.

[13] ElMaraghy, H., Schuh, G., Elmaraghy, W., Piller, F., Schonsleben, P., Tseng, M., Bernard, A., 2013. Product variety management. CIRP Ann. - Manuf. Technol. 62, 629–652.

[14] Christensen, I., 2018. New Product Fumbles – Organizing for the Ramp-Up Process. PhD thesis, Copenhagen Business School.

[15] Von Cube, J.P., Schmitt, R., 2014. Execution of ramp-up projects in day-to-day operations through a quantitative risk management approach. Procedia CIRP 20, 26–31.

[16] Brecher, C., Storms, S., Ecker, C., Obdenbusch, M., 2016. An Approach to Reduce Commissioning and Ramp-up time for Multi-variant Production in Automated Production Facilities. Procedia CIRP 51, 128–133.

[17] Terwiesch, C., E. Bohn, R., 2001. Learning and process improvement during production ramp-up. Int. J. Prod. Econ. 70, 1–19.

[18] Glock, C.H., Grosse, E.H., 2015. Decision support models for production ramp-up: a systematic literature review. International Journal of Production Research, 53 (21), 6637–6651.

[19] Datta, P.P., Roy, R., 2010. Cost modelling techniques for availability type service support contracts: A literature review and empirical study. CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 3, 142–157.

[20] Schuh, G., Gartzen, T., Wagner, J., 2015. Complexity-oriented ramp-up of assembly systems. CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 10, 1–15.

[21] L. Rosenberg, J. Hihn, K. Roust, K. Warfield, 2000. Parametric Cost Modeling of Space Missions Using the Develop New Projects (DNP) Implementation Process.

[22] R.B. Romney, 2004. Innovation in technology for the least product price and cost – a new minimum cost relation for reductions during technological learning. Int. J. Energy Technology and Policy, Vol. 2, 106-129.

[23] T.P. Wright, 1936. Factors affecting the cost of airplanes. Journal of Aeronautical Sciences, Vol. 3 122–128.

PREDICTIONS DE RUL PAR ANALYSE DE SIMILARITES

Laure SIRET[1,2,3], Bruno AGARD[1,2], Christophe DANJOU[1,2], Renan BONNARD[3]

[1] Laboratoire en Intelligence des Données
[2] Département de Mathématiques et génie industriel, École Polytechnique de Montréal, Montréal (Québec) – Canada
[3] SENAI Innovation Institute for Embedded Systems– Florianópolis/SC – Brazil
laure.siret@polymtl.ca, bruno.agard@polymtl.ca, christophe.danjou@polymtl.ca, renan.bonnard@sc.senai.br

RESUME : *La prédiction du temps de vie résiduel – RUL (Remaining Useful Life) est un facteur clé de la maintenance prédictive. Ces prédictions étaient généralement basées sur une expertise métier et sur des procédés statistiques indépendants des conditions d'utilisation des machines en temps réel. Or avec la généralisation des concepts clés de l'Industrie 4.0, l'utilisation des nouvelles technologies permet dorénavant la supervision en tout temps des équipements de production. La recherche sur l'estimation des RUL devient de plus en plus populaire. Or seule une branche de la recherche utilise simultanément des données sur les états systèmes (vibrations, température, usure) et les contraintes qui lui sont appliquées (consignes cibles). La majorité de ces approches utilisent des modèles de prédiction d'un état théorique de la machine pour le calcul des RUL. Dans cet article, la méthodologie présentée a pour objectif la prédiction de RUL basée sur l'analyse des similarités des comportements en fonction des contraintes appliquées et des états du système.*

MOTS-CLES : *Maintenance industrielle, Politiques de maintenance, Data Mining, Fusion d'information*

1 INTRODUCTION ET CONTEXTE

Les équipements de production sont constamment sollicités de manières différentes en fonction du contexte et des objectifs de l'entreprise. Ces sollicitations induisent l'usure de l'équipement et ainsi des opérations de maintenance. La maintenance industrielle peut se définir comme la conception et la planification des opérations de réparations et d'entretien d'un équipement industriel en fonction des facteurs mécaniques, économiques et logistiques. Les stratégies de maintenance ont donc des répercussions fortes sur l'utilisation des équipements par la prévalence du respect des objectifs de sécurité, disponibilité, qualité du produit ou autre objectif de la compagnie. Les analyses économiques et logistiques permettent d'estimer si la maintenance de l'équipement doit être réalisée avant ou après la panne de l'équipement (Blanchard *et al* ,1995). Les analyses fonctionnelles des équipements permettent d'identifier les causes possibles d'une panne (ISO 17359-2018-01). Des outils tels que les arbres d'anomalies – FTA (Fault Tree Analysis), ou encore les analyses de causalités – CNEA (Causal Network Event Analysis), sont des exemples de méthodologies utilisées (Dias *et al.*, 2012). Ces analyses permettent théoriquement d'identifier les sous-ensembles de l'équipement responsables des pannes.

Les politiques de gestion des pannes sont découpées en 2 catégories : correctives et préventives (NF EN 13306). La maintenance corrective convient généralement aux interventions rapides où les coûts générés par la panne sont inférieurs aux coûts d'interventions préventives. Les politiques de maintenances préventives se séparent en trois autres catégories : les maintenances **systématiques**, **conditionnelles** et **prédictive** (Høyland and Rausand, 2009).

Une maintenance systématique a lieu à un intervalle de temps fixe. Une parmi les nombreuses méthodes d'estimation de l'intervalle de temps est l'utilisation de la loi de Weibull (Moukhli, 2011). Le recensement des temps entre chaque panne TBF (Time Between Failures), leur tri puis la détermination des paramètres d'échelle et de forme sont des étapes connues de l'industrie de par leur simplicité, efficacité et faible besoin en données.

Une maintenance conditionnelle indique que les interventions de réparations seront réalisées selon l'occurrence de certains évènements identifiés à l'avance ou selon l'état de fonctionnement de certains sous-ensembles de l'équipement défini par des paramètres clés (par exemple le niveau d'huile dans un moteur). Aucune condition temporelle n'est nécessairement associée à une maintenance conditionnelle. Des politiques de maintenance conditionnelles basées sur les réseaux Bayésiens ou des chaines de Markov ont permis de grandement augmenter le temps entre les arrêts programmés (Sakib, et Wuest, 2018).

La maintenance prédictive est définie comme une extension d'une politique conditionnelle « suivant les prévisions extrapolées » (NF EN 13306) des mêmes paramètres significatifs. Avec l'arrivée des nouvelles technologies d'acquisition de données en temps réel, on observe maintenant une recrudescence des recherches portant sur les maintenances conditionnelles et prédictives (Carvalho *et al.*, 2019). Ces méthodes se basent, soit sur une expertise métier pour l'élaboration d'un modèle de dégradation, soit sur des données de fonctionnement pour l'entrainement de méthodes supervisées, semi-supervisées ou non-supervisées (Javed *et al.*, 2017).

Le temps de vie résiduel ou RUL (Remaining Useful Life) représente la différence de temps entre la date de fin de vie de l'équipement et l'instant t. L'utilisation de politiques de maintenances prédictives passe générale-

ment par une estimation du RUL d'un équipement (Lei *et al.*, 2018). Bien que l'utilisation du Data Mining ait beaucoup élargi les champs des possibilités de la maintenance prédictive et de la PHM (Prognostic Health Management), les approches statistiques sont encore utilisées et sujet de la recherche aujourd'hui (Carvalho *et al.,* 2019). Les procédés statistiques les plus connus sont certainement les procédés Markoviens (Kharoufeh *et al.*, 2010), de dégradation homogène de Wiener (Wang, 2010) ou les filtres de Kalman étendu (Batzel et Swanson, 2009). Le plus gros défaut de ces méthodes est leur caractère indépendant face aux conditions d'utilisation des équipements en temps réel et donc des lois de dégradation aussi indépendantes des conditions d'utilisation en temps réel (Si *et al.*, 2011).

L'arrivée de l'industrie 4.0 (Drath et Horch, 2014) encourage l'utilisation des nouvelles technologies et leur intégration aux systèmes d'information. Une bonne intégration permet de conserver une multitude de données sur les conditions de fonctionnement des équipements de production en temps réel (Danjou *et al.*, 2017). L'application des algorithmes de Machine Learning tels que les arbres de décisions, réseau de neurones, SVM (Support Vector Machine) et K-means sont alors de plus en plus fréquents dans la littérature (Carvalho *et al.*, 2019), (Vogl *et al.* 2019). Les chercheurs étudient dorénavant majoritairement des mesures de conditions dites indirectes (état de l'huile, vibration, température) aux conditions directes (fissure) (Si *et al.*, 2011).

L'analyse des conditions indirectes se distingue en deux grandes familles : celles reposant sur la fusion d'information provenant de différentes sources (vibration, huile, pression, etc.) (Goebel et Bonissone, 2005) et celles se concentrant sur l'analyse d'une information spécifique (uniquement les vibrations) (Knežević *et al.* 2019). Dans le contexte d'une entreprise ayant plusieurs types d'équipements différents, l'étude d'un seul paramètre restreint les cas d'application de la méthodologie. La méthodologie proposée s'oriente donc dans la famille des méthodologies portant sur la fusion d'information. Il existe également de plus en plus de méthodologies essayant de différencier les informations relatives aux consignes imposées par les utilisateurs (vitesse, pression) aux états physiques du système non contrôlable (vibration, huile) (Huang *et al.*, 2019). (Jardine *et al.*, 2005) recense de nombreuses méthodes de distinction et fusion d'information. L'objectif de ces méthodes est de pouvoir relier le cas d'utilisation présent de la machine avec les expériences passées selon un seul et même critère généralement nommé indicateur de survie. Les réseaux de neurones et autres algorithmes sont souvent entrainés sur cet indicateur et une panne est prédite lorsque l'indicateur tombe en dessous d'un certain seuil. Or certaines méthodes de fusion de l'information ne peuvent contraindre l'indicateur de survie à atteindre une valeur minimale de 0 (Jardine *et al.*, 2005). L'identification de la panne peut alors être estimée par l'étude des similarités des temps de fonctionnement. Soit l'analyse des patrons de comportement d'un ensemble de cas passés par rapport au cas actuel étudié. Différentes méthodes d'analyse de similarités existent dans la littérature. Cependant une grande partie repose sur des conditions directes telles que (Kadry, 2012) qui analyse les similitudes de propagation de fissure par Pattern Fuzzy Similarity pour déterminer le RUL de roulement. (Wang *et al.*, 2008) propose une analyse sur des données indirectes - TSBP (Trajectory Similarity Based Prediction) et (Wang *et al.*, 2010) la complète par une intégration des contraintes appliquées au système. Cependant la sélection des données les plus pertinentes n'y est pas automatisée. Plusieurs méthodes de calcul du RUL sont abordées, mais l'estimation directe par une étude statistique des temps de vie des comportements voisins ni est pas étudiée. Enfin des comparaisons simples pour justifier l'analyse des similarités ainsi que l'apport des conditions appliquées ne sont pas spécifiées.

Dans le présent article, nous proposons une nouvelle méthodologie de prédiction de RUL se basant sur les conditions d'exploitation de l'équipement (contraintes imposées par les opérateurs et contraintes de mesure indirectes). La méthodologie a pour objectif une utilisation en industrie et se base sur l'étude des similarités des comportements passés. On note que la présente méthodologie a été développée afin de répondre à un besoin industriel de l'agroalimentaire de transformation de masse de céréales. Dans ce contexte, les paramètres de production sont optimisés pour la production et ne peuvent être modifiés. L'objectif du déploiement de cette méthodologie est d'améliorer l'ordonnancement des travaux de maintenance et de diminuer les temps d'arrêt dus à un contrôle systématique des équipements. Ainsi, on suppose qu'un équipement est **remis à neuf** après une réparation.
La structure de l'article est la suivante : la section 2 expose la méthodologie proposée. La section 3 expose un cas d'application qui montre la mise en œuvre de la méthodologie. Finalement, la section 4 présente les résultats et limites de la méthode.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Définition des termes

On appelle **Contraintes d'Activité** (**CA**) l'ensemble des paramètres de la machine contrôlables par les opérateurs (vitesse, pression, alimentation); et **États du Système** (**ES**) les grandeurs physiques intrinsèques à l'équipement non contrôlable par l'opérateur (vibration, qualité d'huile, température résiduelle). Les **données** sont les mesures de ces paramètres provenant de différents capteurs de mesures, elles couvrent l'ensemble du temps de fonctionnement de la machine. Pour l'ensemble de la méthodologie, les données sont séparées aléatoirement en un **ensemble d'entrainement** (80% des données) et un ensemble de **tests** (20%). La variable **delta** est l'écart entre la valeur réelle et la prédiction du temps de fin de fonctionnement. Un delta négatif signifie que la prédiction est postérieure à la panne effective de l'équipement.

La méthodologie proposée repose sur 3 grandes étapes présentées par la suite (2.2) l'analyse des temps de fonctionnement (2.3) l'analyse mono-facteur caractérisant les ES et enfin (2.4) l'analyse multi-facteurs caractérisant les CA et les ES. La première étape de la méthodologie servira de témoin pour la comparaison des résultats.

2.2 Analyse des temps de fonctionnement

La loi de Weibull est utilisée comme référentiel. Seuls les temps de fonctionnement de l'équipement sont nécessaires, les paramètres d'échelle et de forme de la loi de Weibull sont estimés automatiquement sur l'ensemble d'entrainement (Kadry, 2012). Les prédictions de RUL étant dé-corrélées des données relatives aux ES et aux CA il est possible de réaliser pour chaque individu test plusieurs prédictions aléatoires pour rendre les résultats significatifs.

2.3 Analyse de similarités mono-facteur

Les données considérées dans cette section proviennent d'un capteur décrivant un ES pertinent.

2.3.1 Prétraitement

Les données relatives à la production sont généralement bruitées. Une normalisation en Z et un filtre sont appliqués aux données. Le but est de conserver uniquement la disparité des données au cours du temps afin d'identifier des comportements symptomatiques d'une fin de fonctionnement. Les données extrêmes doivent être conservées. Les données sont ensuite filtrées par la courbe enveloppe supérieure. On pose l'hypothèse que l'utilisation de la courbe enveloppe permet de garder les caractéristiques d'un filtre passe-bas par la sélection de la fenêtre d'échantillonnage des données tout en gardant les données extrêmes.

2.3.2 Analyse de similarités

On suppose que des machines ayant un même comportement auront également des temps de fonctionnement similaires. Cette sous-section va quantifier les comportements similaires entre l'ensemble des données d'entrainement et l'ensemble des données tests. Pour ce faire, plusieurs algorithmes de calculs de distance existent : le calcul des distances point à point ou Dynamic Time Warping (DTW) sont les plus communs (Goebel et Bonissone, 2005).

Pour vérifier les performances de la méthodologie, le calcul de RUL est réalisé à un instant t_c donné, inférieur à tout temps de fin de fonctionnement. L'ensemble des données de test sont tronquées de t=0 à $t = t_c$. Les tailles séries de données sont donc différentes entre elles. L'utilisation de l'algorithme de DTW présente plus d'avantages pour une analyse de structure sur des séries de tailles différentes. L'ensemble des distances est alors calculé et seuls les k (k étant posé arbitrairement) machines ayant les plus petits scores sont conservées pour la suite de la prédiction.

2.3.3 Prédiction de RUL

Chaque donnée de test possède dorénavant un ensemble de données d'entrainement avec des comportements proches que l'on appelle voisinage. Les temps de fonctionnement du voisinage sont extraits et la prédiction du RUL se base sur la médiane du voisinage. Le choix de la médiane nous vient (Wang, 2010)

2.4 Analyse de similarités multi-facteurs

Les données utilisées pour cette section sont l'ensemble des données relatives aux CA et ES. L'Analyse de Similarités Multi-Facteurs (ASMF) se base sur les 4 étapes suivantes.

2.4.1 Identification des régimes de fonctionnement

Les conditions de fonctionnement appliquées à un équipement industriel varient au cours de la production et ont été définies ci-dessus comme les CA d'un équipement. Un ensemble de CA est appelé **régime de fonctionnement**. Les données relatives aux ES varient d'un régime de fonctionnement à un autre (Lei, 2016). Afin de pouvoir comparer et analyser les données d'ES de manière équitable, la première étape de la méthodologie de l'ASMF consiste à normaliser les données selon leur régime de fonctionnement tel que réalisé dans la littérature (Jardine *et al.*, 2006). S'il existe un grand nombre de régimes de fonctionnement, il est alors pertinent de regrouper des régimes similaires entre eux. Cette étape s'organise par (1) le regroupement des régimes de fonctionnement en clusters, (2) la normalisation en Z des données sur les ES selon le régime de fonctionnement.
Le clustering des régimes de fonctionnement est réalisé par un algorithme de recherche des K plus proches voisins - KNN (K-Nearest Neighbors) et le nombre de clusters est sélectionné comme celui minimisant la distance entre les régimes et le centroïde du cluster selon un critère d'arrêt : la première distance inférieure ou égale à une valeur arbitraire.

2.4.2 Identification des paramètres prépondérants

Cette section consiste à l'identification des informations d'ES les plus pertinentes pour la détection de fin de fonctionnement. La partie s'organise selon 3 étapes :
(1) Sélection par corrélations. Dans un équipement, il est fréquent que plusieurs capteurs internes à la machine soient intimement corrélés. Afin d'éviter un surapprentissage, une analyse de covariance est réalisée. Deux capteurs sont dits corrélés entre eux si la valeur absolue de la covariance est supérieure à un seuil fixé arbitrairement.
Le tri des capteurs est présenté dans la figure 3.

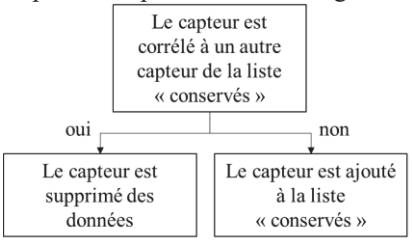


Figure 1 : Sous-étapes d'évaluation des corrélations

Ainsi, seuls les capteurs non corrélés (appartenant à la liste $L_{conservés}$) sont étudiés ce qui limite également les temps de calcul.
(2) Sélection par tendance. La sélection des indicateurs se base sur l'analyse de la tendance et deux méthodes de calcul différentes sont appliquées ; (a) Calcul du coefficient directeur de la régression linéaire issue de chaque capteur, (b) Calcul du rayon du plus petit cercle inscrit de la régression polynomiale d'ordre 3 ou plus.
La première méthode d'analyse met en évidence la tendance des données de manière globale. On prend l'hypothèse que la seconde méthode permet de quantifier la rapidité de modification de la tendance au cours du temps. Plus le rayon est petit, plus les données ont une tendance à évoluer rapidement dans les derniers cycles de fonctionnement de la machine. Chaque capteur est classé et obtient un score selon chacune des méthodes. La somme des scores permet de sélectionner les k meilleurs capteurs où k est un entier arbitraire respectant l'inégalité suivante :

$$k \leq max(2, \left\lfloor len(\frac{L_{conservés}}{2}) \right\rfloor)$$

(3) Filtrage par enveloppe. Les capteurs sélectionnés sont ensuite filtrés en conservant leur courbe enveloppe. La méthodologie et les justifications utilisées pour chacun des capteurs sont les mêmes que pour la section de prétraitement des données de l'analyse à 1 facteur.

2.4.3 Fusion des données

Contrairement à l'analyse mono- facteur, il est nécessaire ici d'agréger les informations des différents capteurs identifiés à la partie précédente dans un **indicateur de survie**. Pour rappel, l'équipement est supposé remis à neuf après chaque opération de maintenance ce qui implique que toutes les machines commencent avec la même valeur de survie. Cet indicateur vérifie les conditions suivantes :

c1. Il est compris entre 0 et 1 pour tout instant t.
c2. L'indicateur est décroissant
c3. Il vaut 1 à t = 0 et 0 lorsque l'équipement tombe en panne

Une première estimation simple d'un tel indicateur est de l'estimer pour chaque machine par une droite dont les paramètres respectent les conditions c2.
La prochaine étape est de fusionner l'information des capteurs à cet indicateur de survie. La fusion de données est donc réalisée avec une régression linéaire multiple notée I. Pour garantir le caractère borné et décroissant, un nouvel indicateur Î est défini tel que Î(t)=min(I(t-1) ; I(t)) où t est indice de temps.

2.4.4 Analyse de similarités et prédiction de RUL

La prédiction du RUL est basée sur la même méthodologie que pour l'analyse de similarités mono-facteur. Les données tests sont tronquées à un instant t arbitraire, mais antérieur à toute panne de l'équipement. Les étapes précédentes de l'ASMF sont ensuite appliquées à l'ensemble test soit (1) la l'identification des régimes de fonctionnement, (2) l'identification des paramètres prépondérants et (3) la fusion des données. À la fin de ces trois sous étapes, une courbe tronquée semblable à une courbe de survie est associée à chaque machine test. L'algorithme de DTW (distance de Manhattan) va ensuite calculer l'ensemble des distances entre chaque courbe test avec chaque courbe d'entrainement. Les k plus proches voisins sont conservés, où k est fixé arbitrairement. La prédiction ponctuelle de RUL est la médiane de l'ensemble des k voisins. Finalement, l'écart *delta* est calculé selon la définition de donnée dans la section 2.1 définition des termes.

3 CAS D'APPLICATION

3.1 Contexte

Les données utilisées sont des données de fonctionnement de turbines fournies par la NASA en 2008 lors de la première conférence internationale Prognostics and Health Management (PHM08). Le cas d'application utilise une partition aléatoire du fichier contenant les données d'entrainement. Le set de données se compose d'un repère temporel, du numéro de machine, de 3 composantes relatives aux CA et de 21 composantes relatives aux ES. La composante de temps a pour unité un cycle de fonctionnement. Les informations obtenues par les capteurs peuvent être du domaine continu ou discret.
À noter que les dernières étapes de chaque sous-méthodologie sont présentées dans la partie 5 "résultat".

3.2 Analyse des temps de fonctionnement

Pour une meilleure estimation des paramètres de la loi de Weibull, l'offset de la série doit être nul. On retranche alors la valeur minimale de la série à l'ensemble des données. La figure 2 présente l'estimation de la loi de répartition.

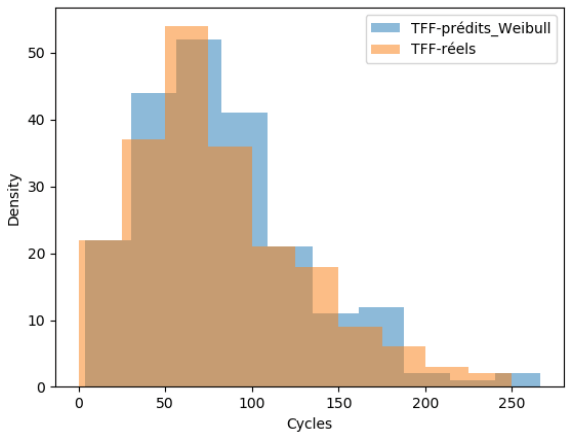


Figure 2 : Histogrammes des temps de fin de fonctionnement réels et prédits par Weibull

3.3 Analyse de similarités mono-facteur

L'analyse des similarités mono-facteur nécessite, comme son nom l'indique, les données relatives à un seul capteur. Les données détaillant les ES de la base PHM08 étant nombreuses, la sélection du capteur 8 a été effectuée aléatoirement.

3.3.1 *Prétraitement*

La figure 3 donne une visualisation après normalisation des données issues du capteur 8.

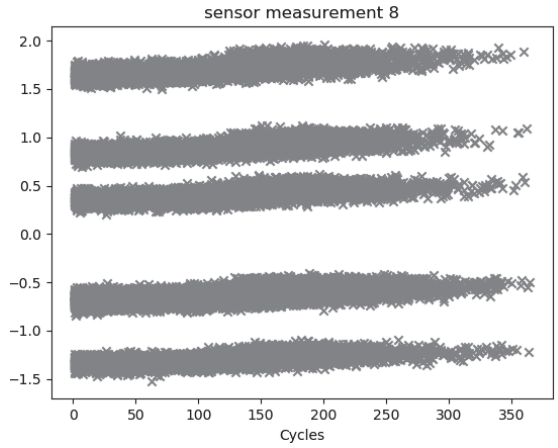


Figure 3 : Capteur 8 après normalisation

Le filtrage des données par la courbe enveloppe est ensuite réalisée et est présentée sur la figure 4.

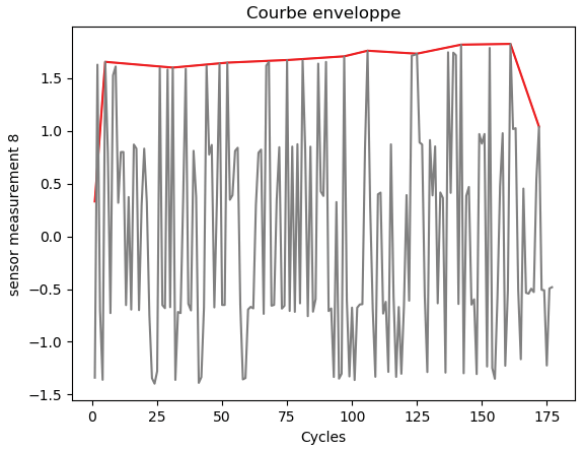


Figure 4 : Courbe enveloppe des données du capteur 8

3.3.2 *Analyse de similarité*

D'après les étapes présentées partie 2.3.2 et grâce à l'étude statistique on identifie un temps de coupure pour les individus test. Un t_c = 100 cycles est sélectionné pour ce cas d'application. L'ensemble des données test sont alors tronquées après t_c. Le vecteur des distances (analyse DTW) est calculé et seuls les k=15 premiers voisins sont conservés pour les prédictions de RUL. Les résultats seront présentés dans la partie suivante « Résultats ».

3.4 Multiples facteurs

3.4.1 *Identification des régimes de fonctionnement*

Les données d'étude contiennent trois informations relatives aux CA. L'analyse des régimes de fonctionnement portera donc sur ces trois colonnes. Les résultats du clustering des différents régimes sont présentés figure 5 et figure 6. La première figure présente les sommes cumulées des distances entre chaque élément du cluster à son centroïde et justifie la sélection de 3 clusters. La figure 6 permet de visualiser les régimes en bleu et les centroïdes par les sphères rouges plus larges. Les données sont alors normalisées selon ces trois clusters.

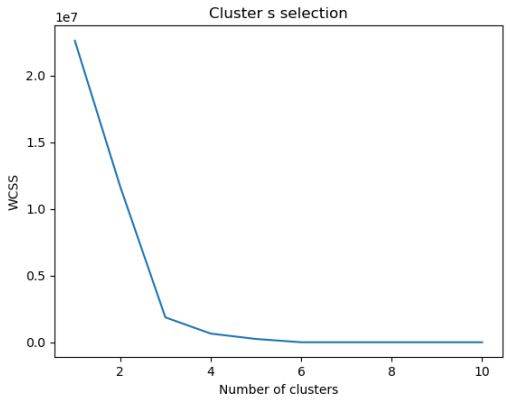


Figure 5 : Courbe des distances aux centroïdes

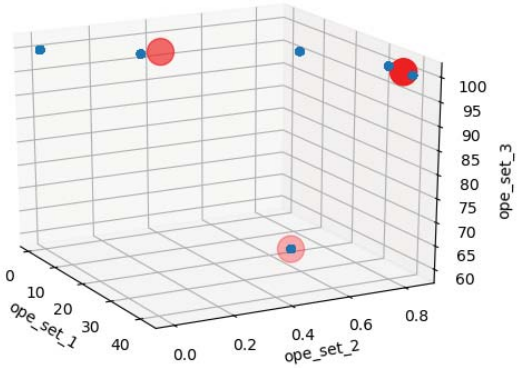


Figure 6 : Clusters des régimes de fonctionnement

3.4.2 *Identification des paramètres prépondérants*

Cette étape se focalise sur l'étude des ES soit 21 colonnes. Les données relatives aux ES étant nombreuses, on fixe le seuil de la covariance à 0.5 afin de limiter au maximum le surapprentissage dû à une redondance des données.

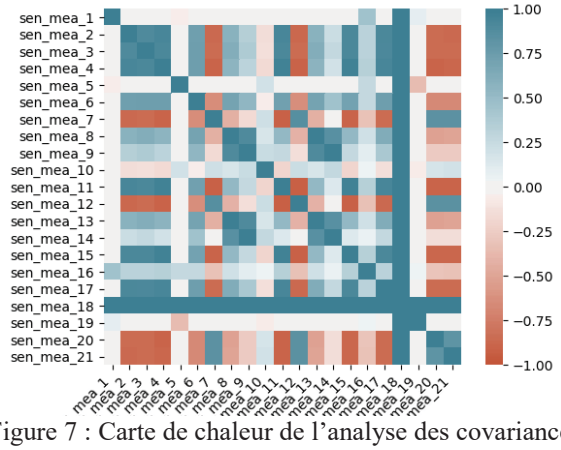


Figure 7 : Carte de chaleur de l'analyse des covariances

Seuls 12 sur les 21 capteurs initiaux sont conservés après l'analyse de covariance. Les tendances globale et locale de ces 12 capteurs sont alors analysées respectivement une régression linéaire et une régression polynomiale d'ordre 3. Les figures 8 et 9 suivantes présentent les résultats des deux régressions.

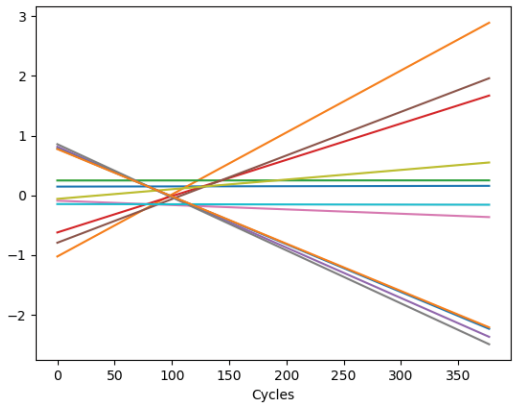


Figure 8 : Résultat analyse de la tendance globale

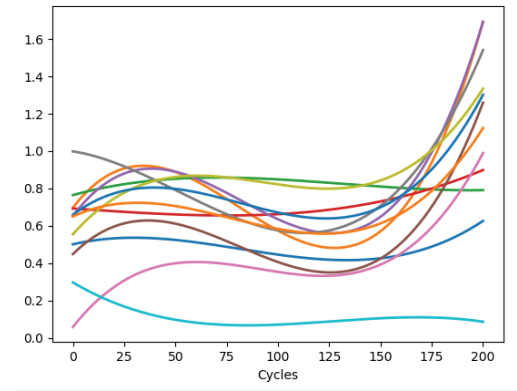


Figure 9 : Résultat analyse de la tendance locale

Chaque capteur est trié selon chacune des régressions avant qu'un score lui soit associé. Seuls les meilleurs capteurs sont conservés pour la suite de l'étude. Un filtrage par courbe enveloppe est appliqué avant de passer à la partie suivante de fusion d'information.

3.4.3 Fusion de données

Dans un premier temps, l'indicateur préliminaire : décroissant et linéaire est calculé. La figure 10 représente cet indicateur pour chaque machine de l'ensemble d'entrainement.

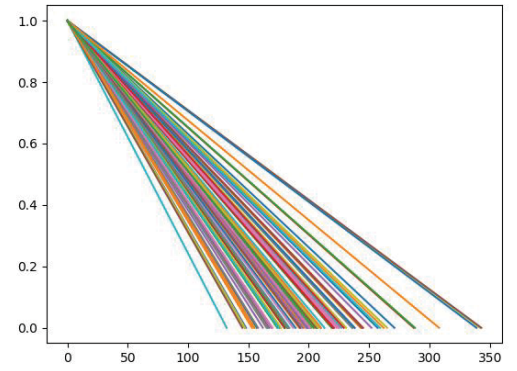


Figure 10 : Indicateur de survie préliminaire

La fusion d'information entre l'indicateur de survie et les capteurs de la partie précédente est réalisée par une régression linéaire. Cet indicateur est ensuite filtré par une fonction en escalier afin de respecter les contraintes de bornes et de décroissance de l'indicateur. La figure 11 présente l'indicateur de survie final. La panne d'un équipement arrive dès qu'il n'y a plus de données et est caractérisée par une croix noire. On peut noter une forme de décroissance exponentielle caractéristique d'une dégradation.

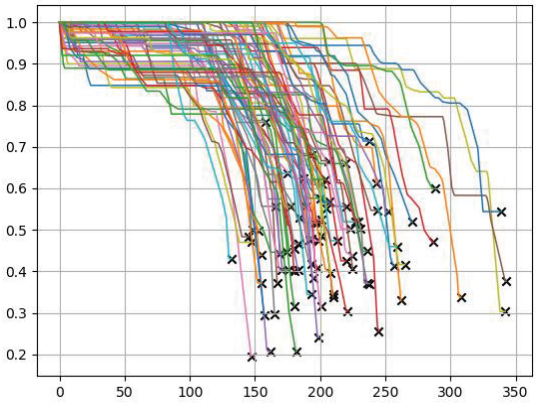


Figure 11 : Indicateur de survie set final

De cet ensemble de courbes de survie, une analyse de similarités avec des données tronquées permet de réaliser la prédiction du temps de vie.

4 RÉSULTATS

La partie suivante regroupe l'ensemble des prédictions réalisées pour le cas d'étude dans figure 12. Les résultats sont présentés via l'indicateur delta défini dans la partie 3.1.–Delta positif et plus proche de 0 caractérise de bonnes prédictions. Au contraire un delta négatif signifie que l'équipement est tombé en panne avant l'estimation ce que l'industriel cherche à éviter le plus possible. Si la prédiction est antérieure à la date de la panne effective, l'impact est moindre. En effet, comme expliqué dans la partie 3.3.2 les prédictions sont réalisées à des intervalles prédéfinis, il est donc possible pour l'opérateur de relancer des prédictions à une période postérieure et donc d'améliorer la prédiction sans prendre de risque supplémentaire sur une panne de la machine.

Pour l'ensemble des histogrammes présentés figure 12, la légende suivante est appliquée : (1-Vert) Vert : 0 < delta < 100 cycles, (2-Orange) Orange : -50 < delta < 0 cycle ou delta > 100 cycles et (3-Rouge) Rouge : delta < -50 cycles
Les barres verticales représentent respectivement le premier quartile, la médiane et le 3^{e} quartile des prédictions.

4.1 Calcul et comparaison des prédictions

Les prédictions des trois sous partie de la méthodologie sont présentées sur la figure 12.
Le tableau 1 ci-dessous présente le nombre de prédictions postérieures au temps de fin de fonctionnement et la variance des prédictions pour les 3 sous-méthodologies. La variance des données d'origines est calculée et vaut 46.7 cycles.

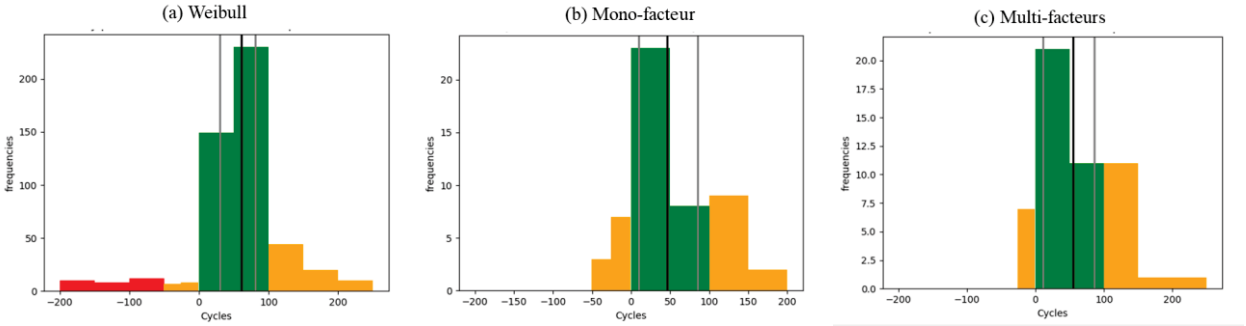


Figure 12 : Répartition delta méthode (a) Weibull, (b) mono-facteur, (c) multi-facteur

Le temps de calcul nécessaire pour 1 prédiction pour un ensemble test de 208 éléments est ajouté à titre indicatif pour un processeur Intel Core i5-3437U CPU, 1.9GHz, 2.4GHz.

	Prédiction après panne	Std (cycles)	Temps de calcul
Weibull	12.9 %	90.96	< 1 s
Mono	19.23 %	53.82	≈ 17 s
ASMF	13.46 %	56.76	≈ 30 s

Tableau 1 : Comparaison des résultats

Les résultats sont comparés selon quatre critères (1) le nombre de prédictions réalisées après que la panne ait réellement eu lieu (Jardin *et al.*, 2006), (2) la gravité des mauvaises prédictions, (3) la disparité de delta et (4) le temps de calcul (Huang *et al.*, 2019).
(1) On cherche à évaluer par ce critère quelle méthode donne le plus grand nombre de prédictions antérieures à la panne. On note que les prédictions réalisées sont antérieures à la panne réelle à plus de 80% pour les 3 méthodes. Le classement des méthodes, de la meilleure à la moins performante, est le suivant : (1) Weibull, (2) ASMF et (3) mono capteur, avec seulement 0.6% d'écart entre Weibull et ASMF.
(2) L'étude de la gravité des mauvaises prédictions (légende présentée partie 4 ci-dessus) permet de quantifier l'impact de mauvaises prédictions sur les décisions de maintenance. On obtient le classement (1) ASMF, (2) mono capteur et (3) Weibull. La présence de (3-Rouge) est ce qui place Weibull en dernier.
(3) On note une augmentation de quasi 2 fois l'écart type pour les prédictions par une loi de Weibull, mais de seulement 0.2 fois pour ASMF et mono capteur. Les intervalles de confiance liés aux prédictions sont donc plus petits pour ces deux dernières méthodes. Des prédictions plus précises permettent de plus facilement déterminer des intervalles de confiance sur l'état de la machine. La planification de la maintenance en est facilitée.
(4) Le temps de calcul nécessaire d'une prédiction pour chaque méthode reste inférieur à 1 minute. Weibull reste la méthode la plus rapide de par sa simplicité. L'ASMF nécessite le temps de calcul le plus long, mais une exécution de moins 1 minute ne représente pas d'inconvénients notables pour l'organisation de la maintenance.

5 CONCLUSION ET DISCUSSION

La méthodologie proposée permet de calculer et comparer des prédictions de RUL selon les similarités de comportement d'une machine. Une intégration des contraintes de fonctionnement et des états du système a donné de meilleurs résultats de prédiction. Les prédictions obtenues par la méthodologie présentent de meilleurs résultats que des analyses communément utilisées telles que Weibull. Bien que le nombre de prédictions en retard par rapport à la réalité soit plus grand de 0.6% pour l'ASMF vis-à-vis de Weibull, l'ASMF prédit de manière plus précise et les mauvaises prédictions impactent moins la production (gravité plus faible).

On remarque qu'une seule prédiction par machine est réalisée au cours de la méthodologie. Or, plus l'instant de la prédiction est proche de la fin de fonctionnement réelle, plus les prédictions seront précises. Afin d'améliorer les performances, il est donc possible de prévoir plusieurs points de calcul des prédictions.
On note cependant que cette méthodologie nécessite beaucoup de données de surveillance en continu et allant jusqu'à la panne de l'équipement (problème aussi identifié pour l'utilisation de la loi de Weibull). La problématique est d'obtenir ou de détecter automatiquement les anciennes pannes du système. Étendre la méthodologie avec un prétraitement par une analyse d'anomalies est une piste à étudier.
L'analyse des contraintes appliquées est réalisée ponctuellement au début de l'ASMF. Or de nouvelles conditions de fonctionnement peuvent impacter le regroupement des régimes de fonctionnement. Pour conserver les bonnes performances de la méthodologie, il serait donc nécessaire de recalculer les régimes de fonctionnement. Prévoir la mesure d'une déviance des centroïdes des régimes de fonctionnement par des méthodes de concept drift permettrait une plus grande autonomie.
Enfin la comparaison des résultats devrait évaluer la robustesse des prédictions. Des métriques telles que présentées par (Saxena *et al.,* 2008) pourraient être une piste d'amélioration.

REMERCIEMENTS

Merci à l'ensemble de l'équipe du centre de recherche du SENAI, SC Brésil et particulièrement au chercheur Herberth Birck Fröhlich pour leur soutien à l'élaboration de cette méthodologie.

REFERENCES

Batzel, T.D., Swanson, D.C., 2009. Prognostic health management of aircraft power generators. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 45 (2), p 473–483.

Blanchard, B-S. Verma, D. and Peterson, E.-L, 1995. *Maintainability - A key to effective serviceability and maintenance management*, Wiley – Interscience

Carvalho, T., Soares, F., Vita, R., Francisco, R., Basto, J., and Alcalá, S., 2019. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering, 137*, 10602

Danjou, C., Rivest, L., and Pellerin, R., 2017. Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité. *PME 2.0 Le passage au numérique.*

Dias, A. Totten, G. and DeNegri, V. J., 2012. *Handbook of Hydraulic Fluid Technology*. Second Edition. CRC Press.

Drath, R., and Horch, A., 2014. Industrie 4.0: Hit or hype? *IEEE Industrial Electronics Magazine, 8*(2), p 56-58.

Goebel, K., and Bonissone, P., 2005. Prognostic information fusion for constant load systems. *7th International Conference on Information Fusion*, vol. 2, p. 9 pp.

Høyland, A., and Rausand, M., 2009. *System reliability theory: models and statistical methods* (vol. 420): John Wiley & Sons.

Huang, C., Huang, H., and Li, Y., 2019. A Bidirectional LSTM Prognostics Method Under Multiple Operational Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(11), p 8792-8802.

James, G., Witten, D., Hastie, T., and Tibshirani, R., 2013. *An introduction to Statistical Learning: Springer*.

Jardine, A. K. S., Lin, D., and Banjevic, D., 2006. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), p 1483-1510.

Javed, K., Gouriveau, R., and Zerhouni, N., 2017. State of the art and taxonomy of prognostics approaches, trends of prognostics applications and open issues towards maturity at different technology readiness levels. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *94*, p214-236.

Lei, Y., 2016. *Intelligent fault diagnosis and remaining useful life prediction of rotating machinery*: Butterworth-Heinemann.

Kadry, S., 2012. *Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems: Methods and Techniques,* (Chapitre 7) p 135-150.

Kharoufeh, J. P., Solo, C. J., and Ulukus, M. Y., 2010. Semi-Markov models for degradation-based reliability. *IIE Transactions, 42*(8), p 599-612

Knežević, I., Zivkovic, A., Šejat, M., Rackov, M., Zeljković, M., and Cofaru, N., 2019. Analysis the amount of lubrication and roughness of raceways on dynamic behavior on the ball bearing. *MATEC Web of Conferences, 290*, 01005

Kolar, D., Lisjak, D., Pajak, M., and Pavkovic, D., 2019. Fault Diagnosis of Rotary Machines using Deep Convolutional Neural Network with three axis signal input. *arXiv,* 1906.0244

Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., and Lin, J., 2018 Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *104*, p 799-834.

Murthy, D.N. P., Rausand, M. and Østeras, T., 2008 *Product Reliability – Specification and performance*, Springer

Moukhli, A., 2011. *Optimisation de la maintenance de roues de turbines hydroélectrique soumises à une dégradation par cavitation*. Mémoire de maitrise ès science appliquées, École Polytechnique Montréal, Canada.

Sakib, N., and Wuest, T., 2018. Challenges and Opportunities of Condition-based Predictive Maintenance: A Review. *Procedia CIRP, 78*, p 267-272.

Saxena, A., Celaya, J., Balaban, E., Goebel, K., Saha, B., Saha, S., and Schwabacher, M. 2008. Metrics for evaluating performance of prognostic techniques. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Si, X., Wang, W., Hu, C., and Zhou, D., 2011. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research, 213*(1), p 1-14

Vogl, G. W., Weiss, B. A., and Helu, M., 2019. A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing, 30(1)*, p79-95.

Wang, Q., Zheng, S., Farahat, A., Serita, S., and Gupta, C., 2019. Remaining useful life estimation using functional data analysis. *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM), 2019*, San Francisco, CA, USA

Wang, T., Yu, J., Siegel, D., and Lee, J., 2008. A similarity based prognostic approach for remaining useful life estimation of engineered systems. *International Conference on Prognostics and Health Management*. Denver, USA.

Wang, T., 2010. *Trajectory Similarity Based Prediction for Remaining Useful Life Estimation*. PhD, University of Cincinnati, USA.

Wang, X., 2010. Wiener processes with random effects for degradation data. *Journal of Multivariate Analysis* 101 (2), p 340–351.

13th *International Conference on Modeling, Optimization and Simuation* - MOSIM*'20 - November 12-14, 2020*
Agadir - Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

Assessing the reduction of empty backhauls using transshipment points

J.-S. TANCREZ, B. DE HAES, T. HACARDIAUX

CORE - Center for Operations Research and Econometrics
Université catholique de Louvain
Chaussée de Binche, 151, 7000 Mons, Belgium.
js.tancrez@uclouvain.be

ABSTRACT: *Further reducing empty running by trucks is clearly an important source of efficiency for transportation companies, as well as a valuable way to decrease their carbon footprint. The Pickup and Delivery Problem (PDP) aims at selecting routes such that the distance travelled empty is as short as possible, given a set of transportation requests. In this context, the driving time constraint may be a key factor since it restricts the number of possible routes for each vehicle. To overcome this time constraint, an opportunity is for vehicles to drop or swap their trailer at intermediary transshipment points. In this paper, we evaluate the benefits of using transshipment points in the PDP to reduce the length of the empty backhauls, and we study how the driving time constraint affects those benefits. For this, we apply a MIP model for the PDP integrating transshipment points, and conduct computational experiments comparing the results with a classical PDP. We find that indeed, when driving time is constraining, enabling transshipment points seems to be of interest (up to* 25% *more reduction in the distance travelled empty).*

KEYWORDS: *Pickup and Delivery Problem, Transshipment Points, Empty Backhauls, Driving Time.*

1 INTRODUCTION

In today's globalized and ever-changing market, companies have to find solutions to meet the demand of their customers while ensuring low transportation costs (Mason and Harris, 2019). Logistic providers have to move smaller volume on larger distances, more frequently (Belenguer et al., 2016). Moreover, the transportation sector has to consider societal challenges, in particular related to sustainability, as this sector is responsible for around a quarter of the EU-28 greenhouse gas emissions (European Environment Agency, 2015). To help them face these challenges, companies can count on improved technologies (i.e. energy efficiency and electrification of vehicles) but they also need to improve the efficiency of the logistics system as a whole (Creemers et al., 2017).

The reduction of empty hauls is an important source of improvement, as they represented 27.3% of the national road freight kilometers in 2010 (European Commission, 2011). This reduction can be achieved by optimizing the planning and the route selection, but also by more profound changes in the routing and return trip policies. Figure 1.a illustrates the simplistic case where full trucks ship products from a supplier to a customer and come back directly and empty, leading to half of the trips travelled empty. Instead, as illustrated in Figure 1.b, empty backhauling can be reduced by making a tour with more stages, where delivery at a customer is followed by loading at a, hopefully close, supplier. The ensuing problem, known in the literature as the Pickup and Delivery Problem (PDP), consists in designing routes that meet transportation requests in such way that the empty distance travelled is as short as possible (Savelsbergh and Sol, 1995).

In such configuration, the driving time limit may be an important constraint since it restricts the length of the tour that can be travelled by a single truck, and the number of possible combinations that can be used in order to decrease empty travelled distances. For instance, given a driving time limit, the tour depicted in Figure 1.b may be too long for a single truck. In this case, the transportation company would have to revert to two trucks, two return trips and longer empty backhauls (Figure 1.a). To circumvent the constraint set by the driving time limit, an option is to integrate intermediary transshipment points, where trucks may drop or swap trailers. This case is illustrated in Figure 1.c, where vehicle T4 collects the load at the supplier *i1*, drops it at the customer *j1* and directly loads the shipment destined to customer *j2* (that was brought from *i2* by truck T5), before visiting customer *j2* and coming back to its starting

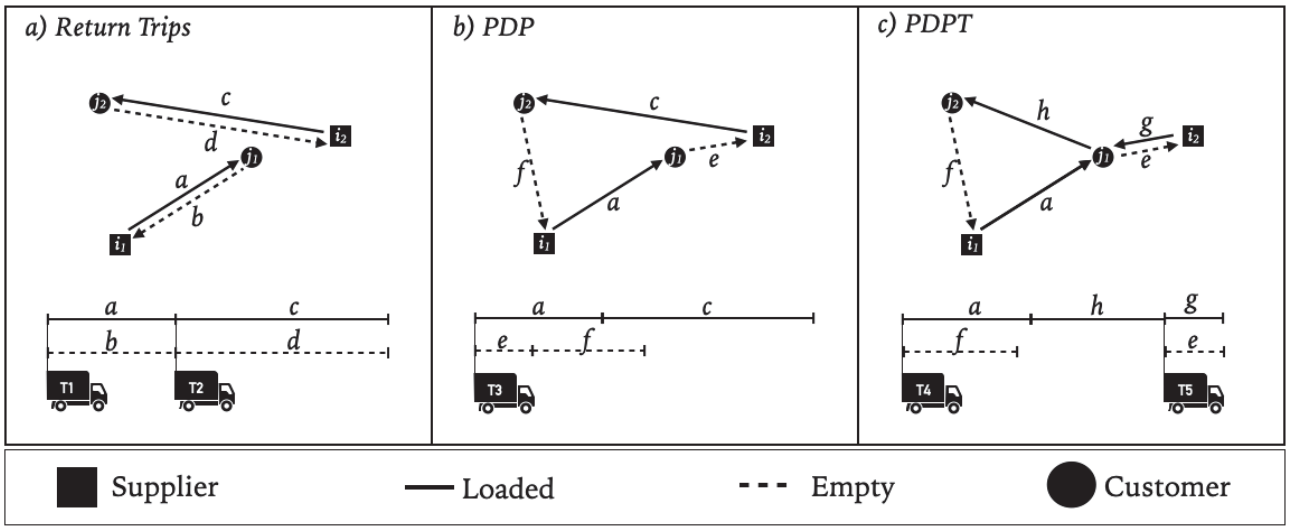


Figure 1 – Illustration of three transportation policies and their impact on travelled distances: (a) direct return trips; (b) pickup and delivery without transshipment; (c) pickup and delivery with transshipment.

point. In this case, the driving time limit is respected and the empty travelling distances are still reduced, using the location of customer *j1* (or close by) as a transshipment point. Also note that the full truckload distance is slightly lengthened, to allow for the trucks to meet at the transshipment point and eventually to reduce empty distances. This configuration naturally leads to an extension of the PDP, called the Pickup and Delivery Problem with Transshipment (PDPT).

In this paper, our goal is to assess the reduction in distances travelled empty when transshipment points are included in the network, and how this reduction is impacted by the tightness of the driving time limit. For this, we compare the results of two MIP models, for the PDP without and with transshipment, and vary the driving time limit. Those comparisons are performed on instances derived from real data of a Belgian transportation company (protected by a non-disclosure agreement), offering mainly long-distance full truckload transportation in Europe.

The remainder of the paper is structured as follows. Section 2 presents the PDPT literature. In Section 3, we present the problem and both PDP models, without and with transshipment points. The reduction in empty distances, the impact of the driving time limit and managerial insights are discussed in Section 4. Finally, Section 5 concludes our paper.

2 LITERATURE

The literature on the pickup and delivery problem (PDP) is vast as many variants have been studied and various solutions methods applied (see for example, Ropke and Pisinger, 2006; Montoya-Torres et al., 2015; Schiffer et al., 2019). Berbeglia et al. (2007) propose a classification of pickup and delivery problems, including the PDP with transshipment (PDPT). Compared to the PDP, the PDPT is less explored in the literature (Danloup et al., 2018), but it has attracted increased attention from the research community in the last few years for its ability to design an agile and intelligent distribution network that helps reducing travelled distances. The PDPT, which is studied in this paper, considers a fleet of vehicles which can exchange trailers or customer requests at special locations, called transshipment points. These locations can be specific facilities like depots of carriers or cross-docking centres, when a specific equipment is required to operate the transshipment, or more simply, public places like parking areas or motorway service areas when the goods or complete trailers can be moved between vehicles without specific equipment (Vornhusen et al., 2014).

In addition to two metaheuristics to solve the PDPT (a large neighbourhood search and a genetic algorithm), Danloup et al. (2018) present an extensive literature review on the PDPT, distinguishing exact and heuristic methods. In the following, we present the contributions that are most related to our research. Mitrović-Minić and Laporte (2006) propose a two-phase heuristic to solve a PDPT with time windows. The construction phase provides several solutions using various random initial orderings of the requests and the improvement phase modifies the best solution found by successively removing and reinserting the requests. The authors then use their heuristic to assess the impact of four transshipment points in the transportation networks, considering uncapacitated vehicles delivering up to 100 transport requests to several cities. The total route length is reduced in comparison with the model without transshipment, with different magnitudes depending on the instances (from 2% to 40%). The benefits increase with the

number of requests and when time windows are less restrictive. Rais et al. (2013) also show that transshipment points may bring benefits, presenting mixed integer programming models with and without time windows. The objective of their model is to find a set of minimum-cost vehicle routes for meeting all customer requests. They consider a fleet of capacitated vehicles which are able to exchange part of their customer requests at transshipment points. The authors demonstrate that the routes including transshipment points are shorter in five of the ten 10-node instances, and eight of the ten 14-node instances. Vornhusen et al. (2014) assess the benefits of transshipment in a collaborative context, using a mixed-integer programming model. In their model, a single customer request can be split among different vehicles while the schedules of the deliveries must be synchronized. The authors analyse 10 instances with two carriers (one vehicle per carrier), nine requests and one transshipment point. The cost reductions coming from the collaboration and the request exchanges are of around 19% and the use of one transshipment point brings additional benefits ranging from 2% to 4%.

In our paper, we consider the PDPT faced by a long-distance full truckload transportation company. We analyse instances built from real data including a large number of transshipment points (around 40 possible locations) and assess the benefits on around 20 requests. Moreover, we study the impact of the driving time limit, which is a determining factor to choose between a classical PDP and a PDPT (i.e. to know when the additional operational costs due to transshipment are valuable).

3 MODELS PRESENTATION

3.1 Pickup and delivery

The pickup and delivery problem we study is the classical problem faced by long-distance full truckload transportation companies. Given a set of commodities, i.e. shipments to deliver from suppliers to customers, the goal is to select the shortest combination of routes, minimizing the empty travelled distance (as full truckload distance is fixed). Importantly, each truck has to respect a certain driving time limit (e.g. for legal reasons). We assume that the fleet of vehicles is homogeneous and that the number of vehicles/drivers (potentially contractors) available is sufficient and geographically spread, i.e. that the number of vehicles is not limiting. In the following, we formulate a simple MIP model for this PDP without transshipment, which will serve as a comparison point in our numerical experiments. We will include transshipment points in the next subsection. Table 1 lists the notations that will be used throughout the paper.

Sets and indices:

$i, j \in S_L$	Locations.
$k \in S_K$	Commodities.
$v \in S_V$	Vehicles.

Parameters:

$Dist_{ij}$	Distance between nodes i and j, in km.
T_{ij}	Driving time between i and j, in $hours$.
R_k	Number of shipments for commodity k.
O_k	Origin location of commodity k.
D_k	Destination location of commodity k.
Th	Handling time at a location, in $hours$.
$Tmax$	Driving time limit, in $hours$.

Decision variables:

x_{ij}^v	Number of loaded trips from i to j by v.
y_{ij}^v	Number of empty trips from i to j by v.
f_{ij}^k	The flow of commodity k on arc (i, j).

Table 1 – Overview of the mathematical notations.

$$\min \quad \sum_{i,j,v} Dist_{ij}(x_{ij}^v + y_{ij}^v) \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{v} x_{ij}^v = R_k \qquad \forall\, k,\, i = O_k,\, j = D_k \tag{2}$$

$$\sum_{i,v} x_{ij}^v + y_{ij}^v = \sum_{i,v} x_{ji}^v + y_{ji}^v \qquad \forall\, j \tag{3}$$

$$\sum_{i,j} (x_{ij}^v + y_{ij}^v) \cdot (T_{ij} + Th) \leq Tmax \quad \forall\, v \tag{4}$$

$$x_{ij}^v, y_{ij}^v \in \mathbb{Z}^+ \qquad \forall\, i, j, v \tag{5}$$

The objective (1) is to minimize the total distance, made of loaded and empty trips. Constraints (2) stipulate that the demand for a commodity k should be satisfied, directly from its origin location to its destination location. The only potential for improvement is thus in the empty backhauling trips. The vehicle flow conservation constraints (3) ensure that each vehicle arriving at a node j also leaves it. Constraints (4) prevent a vehicle/driver to work more than the driving time limit. Note that the time limit includes the driving time (mostly) but also the handling time spent for loading/unloading the trailer whenever entering into a node. Finally, constraints (5) enforce the integer nature of the decision variables.

Note that this model does not include subtour elimination constraints. As the number of available vehicles is supposed to be sufficient, two subtours could simply be run by two different vehicles (and the driving time would still be complied with). Subtour elimination could be included in the same way as proposed by Rais et al. (2014) who first propose a model without subtour elimination and then an extension including variables z_{ij}^v and constraints to model precedence.

In our numerical experiments, both models, for the PDP and the PDPT, do not include subtour elimination to be comparable, and this of course reduces the computational complexity significantly.

3.2 Pickup and delivery with transshipment

As discussed in the introduction, and illustrated in Figure 1, transshipment points may help complying with the driving time limit and reducing the empty travelled distance. In this subsection, we include the possibility of transshipment points in the PDP model presented earlier, building on network design modelling ideas. At a transshipment point, a vehicle may drop, pickup or swap its trailer. In this model, we suppose that the transshipment locations are those of customers and suppliers (or in the same city). Note that this assumption is not limiting, as any location could easily be added as a *virtual* customer with no demand (no commodity attached to it). We assume that the timing and synchronization of the vehicles routes is decided after they have been designed using the PDPT model. A time (Th) for handling the operations related to dropping, picking or swapping a trailer at a transshipment is included in the model. In the following, we formulate the PDPT model, including transshipment.

$$\min \quad \sum_{i,j,v} Dist_{ij}(x^v_{ij} + y^v_{ij}) \tag{6}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_j f^k_{ij} - \sum_j f^k_{ji} = R_k \qquad \forall\, k,\, i = O_k \tag{7}$$

$$\sum_j f^k_{ij} - \sum_j f^k_{ji} = -R_k \qquad \forall\, k,\, i = D_k \tag{8}$$

$$\sum_j f^k_{ij} = \sum_j f^k_{ji} \qquad \forall\, k,\, i \neq O_k, i \neq D_k \tag{9}$$

$$\sum_v x^v_{ij} = \sum_k f^k_{ij} \qquad \forall\, i, j \tag{10}$$

$$\sum_{i,v} x^v_{ij} + y^v_{ij} = \sum_{i,v} x^v_{ji} + y^v_{ji} \qquad \forall\, j \tag{11}$$

$$\sum_{i,j} (x^v_{ij} + y^v_{ij}) \cdot (T_{ij} + Th) \leq Tmax \quad \forall\, v \tag{12}$$

$$x^v_{ij}, y^v_{ij} \in \mathbb{Z}^+ \qquad \forall\, i, j, v \tag{13}$$

$$f^k_{ij} \geq 0 \qquad \forall\, i, j, k \tag{14}$$

As in the PDP model, the objective 6 is to minimize the total distance. Constraints (11-13) are also conserved from the PDP model, to represent the vehicle flow conservation at each location and the driving time limit. Constraints (7-9) are the network flow conservation constraints (at a commodity's origin, destination or transshipment point). They ensure that each commodity is shipped from its origin to its destination, whether with a direct delivery or using transshipment. They allow for commodities to go through one or more transshipment points. It also means that, unlike for the PDP, loaded trips are no longer predefined but are also a decision of the model. Constraints (10) relate the commodity flows and the vehicle flows. They guarantee that every flow/arc of commodity built in the network is covered by a vehicle. A commodity may thus be served by several vehicles. Finally, constraints (14) enforce the positive nature of decision variables f^k_{ij} (the integer nature of f^k_{ij} does not need to be enforced).

4 COMPUTATIONAL EXPERIMENTS

4.1 Experimental setting

The instances used in our experiments are based on data from a Belgian long-distance transportation company (due to strict confidentiality reasons, we are not allowed to give more information on this collaboration). From the weekly transportation requests of the company, we build 8 different commodity matrices (instances), each with around 20 transportation requests (22.4 on average) spread across around 40 locations (43.4 on average, which are also possible locations for transshipment points). Distances between locations are computed using the haversine formula (distance as the crow flies) and multiplied by a factor of 1.34 to estimate the actual road distance (Héran, 2009). The average distance from a commodity's origin to its destination is $581km$, and the average distance between two locations is $705km$ (as seen in Figure 2, locations are spread all over Europe). To compute the driving time, we assume an average speed of $70km/h$. A handling time Th of half an hour is supposed, identical at all locations, whether it is to unload, load or exchange a trailer (Vornhusen et al., 2014). To illustrate, Figure 2 shows the routes computed for a specific instance. Tours with multiple commodities appear when the PDP model is applied (Figure 2.b). Transshipment points are used when the PDPT model is applied, for example to reach a remote location in the North-East (Figure 2.c).

In a first set of experiments (see Section 4.2), we solve our 8 instances with both models, PDP and PDPT, considering a driving time limit of 35 hours, corresponding to a workweek. In a second set of experiments, to study the impact of the driving time limit (see Section 4.3), we solve 4 instances (for computational time's sake) with both models, PDP and PDPT, varying the driving time from $30h$ to $80h$. This leads to a total of 96 experiments. Note that when the driving time does not allow to satisfy a transportation request even with a direct return trip (e.g. a request longer than $1225km$ when supposing $35h$ driving time), we suppose that it is performed with a return trip, extending the driving time of the vehicle as little as possible. This only happens with

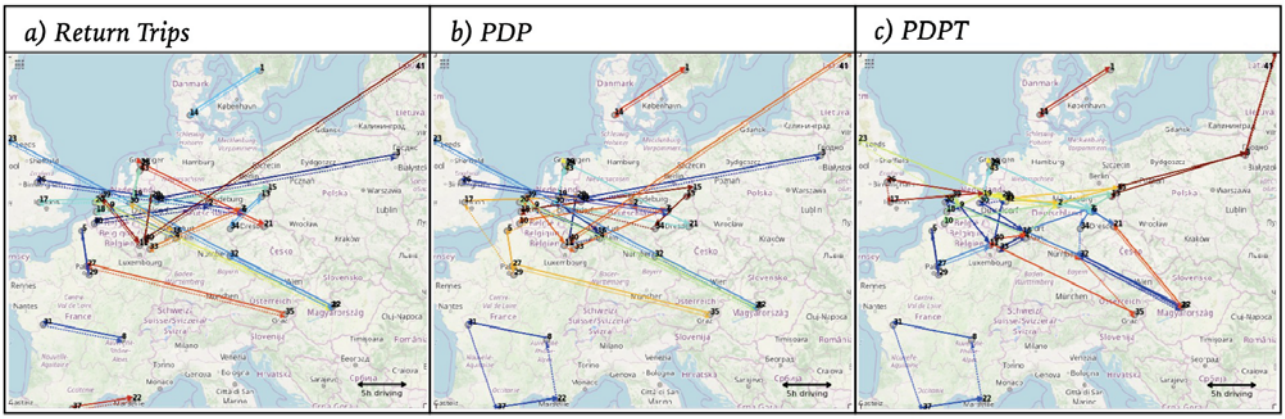


Figure 2 – Routes computed for a specific instance, supposing return trips (a), applying the PDP model (b), and including transshipment (c). Loaded trips are in solid lines and empty trips are in dashed lines.

the PDP, and not with the PDPT as transshipment point allow to reduce the length of a tour. In fact, this may be seen as an advantage of transshipment points: allowing to always comply with the driving time limit.

Both models, the PDP and the PDPT, have been implemented in Mosel using the MILP solver of Xpress IVE. All computations are conducted on an Intel Core processor running at 3.2 GHz with 8 GB of RAM. The computational time per instance is limited to two hours and the computations stop when an optimality gap of 0.5% is reached. The resulting average optimality gap in our 96 experiments equals 2.5%.

4.2 Potential benefits of transshipment

In this subsection, we discuss the results of our first set of experiments, solving our 8 instances with a driving time limit of 35 hours. Table 2 gives the average results, comparing to direct return trips. The PDP allows to reduce the total distance by 13% and adding transshipment allows to further reduce it by a substantial 10.8%. Unsurprisingly, this reduction comes from the reduction of empty trips, which are reduced by 50% with the PDPT, compared to direct return trips. The important difference in results comparing PDP and PDPT comes from the fact that indeed transshipment points are extensively used, 12.6 times per instance on average, i.e. for more than half of the transportation requests (56.2%). Using transshipment points leads to detours, which justify the slight increase in loaded distance (2.3%), while, using PDP, loaded trips are of course unchanged compared to direct return trips.

	PDP	PDPT
Loaded	0%	+2.3%
Empty	-25.9%	-50.0%
Total	-13.0%	-23.8%
Transshipments	0	12.6

Table 2 – Average change compared to return trips in loaded, empty and total distances, for the PDP and for the PDPT, and average number of transshipments per instance, when assuming $35h$ driving time (8 instances).

4.3 Impact of the driving time limit

With the second set of experiments, our goal is to assess the impact of the driving time limit, as it is one of the main motivations to include transshipment. Figure 3 shows that the driving time limit is indeed a determining factor. With transshipment, the distance reduction is stable, mostly independent of the driving

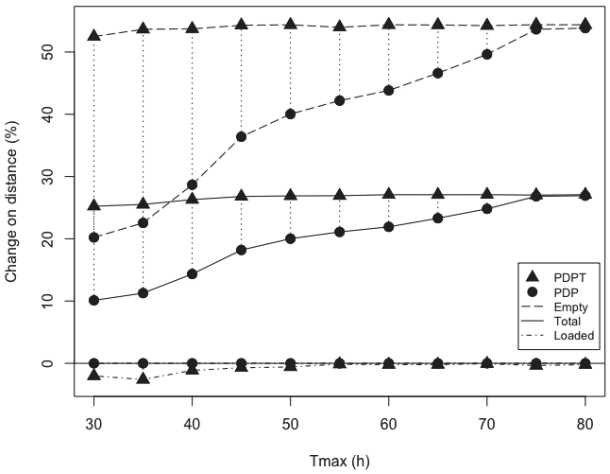


Figure 3 – Average change compared to return trips in loaded, empty and total distances, for the PDP and for the PDPT, with varying driving time limits (4 instances).

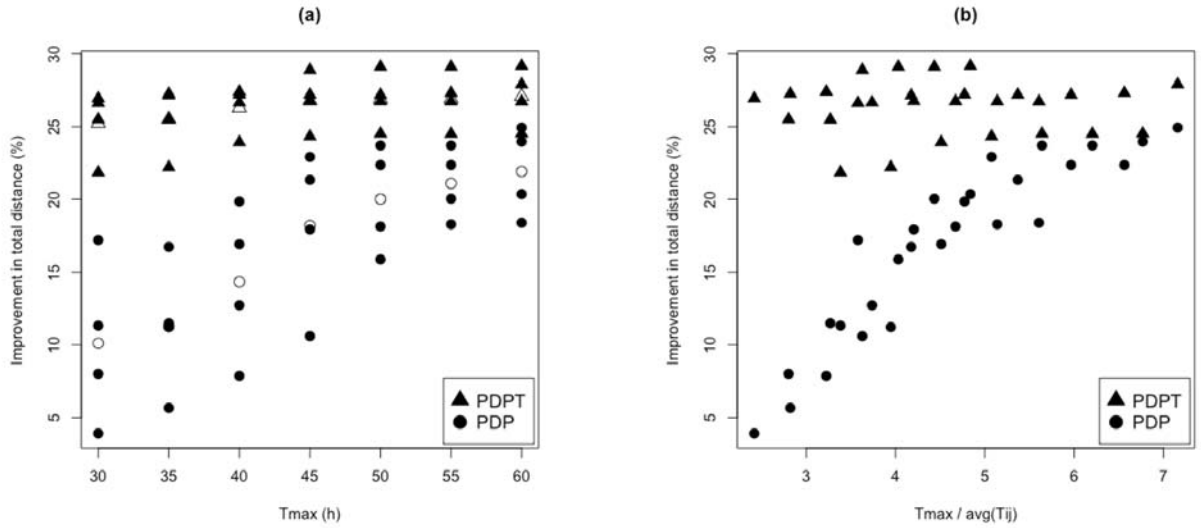


Figure 4 – Improvement in total distance, compared to return trips, for the PDP and for the PDPT, for the 4 instances, with driving time limits from $30h$ to $60h$.

time limit, around 25% in total distance and around 50% in empty distance. On the opposite, the distance reduction when transshipment points are not considered (PDP) is clearly a function of the driving time. When the driving time limit is tight, allowing for transshipment makes a substantial difference (from 10.1% to 25.2% on average total distance with $30h$ driving time). The benefit of transshipment points decreases regularly as the driving time increases, up to a point where transshipment does not bring any value and the PDP should be solved rather than the PDPT for simplicity sake.

To further understand when transshipment is worth considering, and the PDPT worth solving, we first show in Figure 4.a the total distance reduction for each of the four instances, and on average (empty triangles and circles, corresponding to the solid lines in Figure 3). It appears clearly that the driving time alone is not sufficient to foresee the extent of the difference between PDP and PDPT results. With $30h$ driving time for example, the PDP distance reduction varies widely, from 3.9% to 17.2%. The driving time has to be balanced with the length of the arcs that the vehicle will have to travel during this time. When designing the routes, if many shipments can easily be included in one vehicle tour, the PDP will be efficient to combine those shipments and reduce empty distances. When the number of possible shipments in a tour decreases, the opportunities to combine shipments in order to reduce empty trips decreases as well. In this case, transshipment points are valuable as they help relax the tension of the driving time limit and increase the number of possible combinations (with not only complete shipments but also partial segments of shipments).

To reflect this, we propose to divide the total driving time limit by the average driving time between all pairs of locations in the instance, i.e. $Tmax \,/\, \text{avg}(T_{ij})$. This *« tension»* measure roughly represents the number of nodes (or arcs) that we can hope to include in a vehicle tour, on average. Figure 4.b shows the total distance reduction for each of the four instances with various driving time limits as in Figure 4.a, but as a function of this *« tension»* measure. As anticipated, it appears to be a better predictor of the results of the PDP, as the results provided by the various instances with various driving time limits tend to be quite consistent. When only few nodes can be visited by a vehicle during its driving time (small $Tmax \,/\, \text{avg}(T_{ij})$), PDP is powerless to reduce empty backhauls and the distance reduction is mild.

Figure 4.b thus also allows to distinguish more clearly cases where applying the PDPT model and considering transshipment points is beneficial. If the *« tension»* measure, $Tmax \,/\, \text{avg}(T_{ij})$, is around four or less, transshipment is clearly advised, as it may help further decreasing the total distance, by more than 10%. If this measure is in the vicinity of five, transshipment points may still be worth considering, depending of the organisational burden they represent. Finally, for values larger than six, transshipment is likely not worth considering. In short, transportation companies should consider including transshipment points in their operations if a tight driving time limits leads their vehicles to visit five or less locations per tour.

5 CONCLUSION

For transportation companies, a key issue for reducing their costs is the shortening of empty backhauling trips. To this end, the PDP aims at designing routes that meet transportation requests, while reducing the distance travelled empty. In such problems, the driving time limit appears to be decisive since it restricts the length of a tour that can be achieved by a single truck. To circumvent this limit, the PDPT includes intermediary transshipment points that can be used by vehicles to swap their trailers. In this paper, we aimed to assess the additional benefits in distance reduction brought by the introduction of transshipment points in the network, and to study the impact of the driving time limit on those benefits.

To achieve this, we applied MIP formulations for the PDP and the PDPT, and conducted 96 computational experiments based on real data from a Belgian long-distance transportation company. We found that, compared to the PDP, the PDPT makes a substantial difference, allowing for up to 25% more reduction in the distance travelled empty. However, the additional benefit brought by transshipment points decreases regularly as the driving time constraint is released. From our experiments, it appears that considering transshipment points is advisable as soon as the driving time limit prevents a vehicle from visiting more than five locations in one tour, on average. In other words, considering transshipment points is of clear interest when the driving time limit tightens or when the distances to be covered increases: two real challenges of today.

This research could be extended in several directions. A first potential improvement would be to consider the reduction in CO_2 emissions, assuming that emissions depend on whether a vehicle is loaded or empty. Also, it would be interesting to account for the interoperability challenge by considering a heterogeneous fleet of vehicles. Finally, now that the potential savings regarding the use of transshipment points are assessed, the natural next step could be to integrate the problem of ensuring the good synchronization of the transshipment operations.

REFERENCES

Belenguer, J.M., Benavent, E., Martínez, A., Prins, C., Prodhon, C. and Villegas, J.G., 2016. A branch-and-cut algorithm for the single truck and trailer routing problem with satellite depots. *Transportation Science*, 50(2), pp.735-749.

Berbeglia, G., Cordeau, J.F., Gribkovskaia, I. and Laporte, G., 2007. Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *Top*, 15(1), pp.1-31.

Creemers, S., Woumans, G., Boute, R. and Beliën, J., 2017. Tri-vizor uses an efficient algorithm to identify collaborative shipping opportunities. *Interfaces*, 47(3), pp.244-259.

Danloup, N., Allaoui, H. and Goncalves, G., 2018. A comparison of two meta-heuristics for the pickup and delivery problem with transshipment. *Computers & Operations Research*, 100, pp.155-171.

European Environment Agency. Greenhouse gas emissions from transport. Copenhagen: 2015

European Commission, 2011. Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system.

Héran, F., 2009. Des distances Ã vol d'oiseau aux distances réelles ou de l'origine des détours. *Flux*, (2), pp.110-121.

Mason, R. and I. Harris, 2019. A review of freight and the sharing economy. *Future of Mobility: Evidence Review*.

Mitrović-Minić, S. and Laporte, G., 2006. The pickup and delivery problem with time windows and transshipment. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 44(3), pp.217-227.

Montoya-Torres, J.R., Franco, J.L., Isaza, S.N., Jiménez, H.F. and Herazo-Padilla, N., 2015. A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*, 79, pp.115-129.

Rais, A., Alvelos, F. and Carvalho, M.S., 2014. New mixed integer-programming model for the pickup-and-delivery problem with transshipment. *European Journal of Operational Research*, 235(3), pp.530-539.

Ropke, S. and Pisinger, D., 2006. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation science*, 40(4), pp.455-472.

Savelsbergh, M.W. and Sol, M., 1995. The general pickup and delivery problem. *Transportation science*, 29(1), pp.17-29.

Schiffer, M., Schneider, M., Walther, G. and Laporte, G., 2019. Vehicle routing and location routing with intermediate stops: A review. *Transportation Science*, 53(2), pp.319-343.

Vornhusen, B., Wang, X. and Kopfer, H., 2014. Vehicle routing under consideration of transhipment in horizontal coalitions of freight carriers. *Procedia CIRP*, 19, pp.117-122.

UNDERSTANDING THE DETERMINANTS OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY ADOPTION STAGES AND SUPPLY CHAIN PERFORMANCE USING THE TECHNOLOGY-ORGANIZATION-ENVIRONMENT FRAMEWORK

Manal HADER, Abderrahman EL MHAMEDI

Paris 8 University
Paris, France
manalhader94@gmail.com, a.elmhamedi@iut.univ-paris8.fr

Abdellah ABOUABDELLAH

The National School of Applied Sciences
Kenitra, Morocco
a.abouabdellah2013@gmail.com

ABSTRACT: *With the recognition of the considerable benefits of blockchain technology, researchers have paid increased attention to its implementation in the Supply Chain. However, since prior research were conducted there is a dearth of studies considering blockchain technology adoption stages (evaluation, adoption, and routinization).*
To fill in this gap we developed an integrated model with special considerations related to the blockchain technology specificities to examine how technological, organizational, and environmental factors influence the three-stages of blockchain technology adoption process in the supply chain. This study provides a holistic view of blockchain technology diffusion in firms level with practical guidance for successful blockchain technology implementation in supply chain.

KEYWORDS: *Blockchain technology, Supply Chain, Information technology, Technology-organization-environment, TOE framework, Adoption, Adoption stages,*

1 INTRODUCTION

Emerging from the world of crypto-currencies in 2008 (Nakamoto 2008), blockchain technology appeared as a new type of information system with several applications related to many fields such as healthcare (Farouk et al.,2020); food information security (Mettler 2016); e-government (Zhang et al.,2019) ; cybersecurity (Taylor Rodriguez Vance et al., 2019) and energy systems (Chen et al., 2019).
It is considered as a secure way to transact, that decrease the use of intermediaries and regulatory authorities like notary services, banks, and centralized middlemen (Zhang et al.,2019).
Blockchain technology can also have huge impact on operations and supply chain domain. Available research has cleared up the potential of blockchain technology to transform each of the SCM processes which improve its performance and decrease inefficient transactions. Amongst the advantages, blockchain technology could improve complex supply chain issues like transparency, traceability, security and product safety (Hader et al.,2020) and so forth. Thus, blockchain technology could be a driver of a supply chain long term growth and sustainability. Hence, enterprises are becoming more interested in blockchain technology to manage their supply chain. While recent studies have emphasized blockchain benefits in the supply chain field, some early use cases that materialize blockchain investigations have already started, those use cases are increasing over the years like any new technology or innovation.
Nevertheless, blockchain faces different obstacles in implementation by supply chain networks, organizations are still attentive as they weigh the benefits related to this technology against the obstacles to its adoption (Zhang et al.,2019). Therefore, many enterprises simply postpone their decision on blockchain technology adoption, pondering whether their current organizational conditions are ready for blockchain technology implementation.
To balance the benefits and barriers, the first task of adopting blockchain technology is to assess it. (Çolak et al.,2020) Nevertheless, a review of blockchain management literature leads to identify some gaps. Literature often cites blockchain technology case applications or the benefits of blockchain technology on the supply chain. However, there is a paucity of studies that work on blockchain technology evaluation in research and practice which leads to complexities that include inter-organizational consensus.
Therefore, we aim to fill this gap in blockchain technology literature by providing practical guidance for blockchain technology integration within supply chain at the company level. To achieve this, we set up the following research objectives:
1- To develop an integrated framework that enables a holistic perspective to investigate potential factors from the context of the TOE framework (i.e. technology-organization- environment) that can affect the entire blockchain technology adoption stages within enterprises
2- To generate a high-level proposition from the framework developed to enable future studies to develop specific hypothesis from propositions for their empirical tests. Former research has aimed to define model for

blockchain adoption in supply chain based on the TOE framework (Clohessy 2019). However, these authors do not make the crucial differentiation between the impact that the antecedents of blockchain technology could have on each of the stages of its implementation, as it is commonly assumed in the information systems that the effects of one technology antecedent may vary throughout its adoption process (Cruz-Jesus et al.,2019). By incorporating adoption stages in our conceptual model, we can explore how the proposed blockchain technology antecedents affect each of the three adoption stages individually from initiation to routinization, in enterprises. Examining this possibility and providing a clear vision about its adoption process at the firm level is both useful and one of the main contributions of this work for blockchain technology integrated supply chain literature

The paper is structured as follows: Section 2 provides an introduction to our theoretical base, followed by the conceptual development where we proposed eight propositions to illustrate how factors from three aspects that is, technology aspect, organizational aspect, environmental aspect, affect each of the stages of blockchain technology diffusion process in Section 3. Subsequently, section 4 presents a discussion about both theoretical and practical implications of our study. The concluding section 5 summarizes the most important insights and limitations and provides an outlook on future research.

2 THEORTICAL BACKGROUND

2.1 Technology Diffusion Process

This study draws from three streams of research: (1) technology diffusion process, (2) technology-organization-environment (TOE) framework, and (3) BC-SCM.

Technology Diffusion Process:

Innovation diffusion is described as a stage-based process of "spreading a new technology among potential adopters" . This process occurs over a sequence of steps which first starts by an awareness about the technology itself including the benefits and barriers to implement it in the organization. This step is followed by a formal decision to adopt the technology, and then implementation as a beginning of the integration, the technology (Ngah ,2017).

Most of studies in the literature divided the process of IT innovation adoption into three different stages. Although those stages do not have necessarily the same names in all works; like for example:

1- Perception, adoption, and implementation. (Koa et al.,2008)
2- Evaluation, adoption, implementation, and use. (Puklavec, B. et al., 2018)
3- Adoption, assimilation, implemntaion (Wu, Chen (2014).
4- Evaluation, adoption, and routinization (Junior et al., 2019)

Just to cite few, we notice that the three stages cited in the different studies are concordant.

Some researchers propose a six-stage model of adoption process (Sepasgozar and Bernold. 2012), which are:

1- Initiation: evaluating the technology and gathering related information
2- Adoption: Getting the enterprise resources commitment for IT implementation
3- Adaptation: train employees to use the technology and initiate IT and organizational procedures to tailor the solution to the enterprise needs.
4- Acceptance: motivate and encourage employees to engage in use of the solution
5- Routinization: ensuring that the technology is incorporated into work procedures and employee habits.
5- Infusion: Making the most of the technology by involving it in all processes to benefit from all its advantages.

However, in other papers a simple version of technology diffusion is suggested, for example in their work about the implementation of Green IT (Bose and Luo 2011),the diffusion process of software-as-a-service (SaaS) (Martins et al., 2016) and the assessment of broadband mobile applications (Chen and Gao 2017) .

The authors simplified the stages-adoption to three stages of initiation, adoption, and routinization.

As the adoption of BCT-SC (blockchain technology adoption in supply chain) significantly impacts business process change, collaborative relationships among partners. Hence, blockchain technology adoption can be viewed as an "IT innovation adoption". Thus the theory of adoption stages seems to be relevant, it examines the BCT-SC adoption, which could be different in each stage according to the related antecedents, which makes our analyze useful to have a comprehensive understanding of BCT-SC through different adoption stages.

For parsimony, following the cited approach, we propose a three-stage model of blockchain technology adoption in supply chain.

Initiation is the first stage, where perceived advantages of BCT-SC are being assessed across all related process at firm level to complete the attitude towards the BCT-SC adoption.

BCT-SC adoption is the following stage, which consists in formalizing the adoption decision by evaluating the IT infrastructure and financial requirement for its integration. (Martins et al., 2016)

The last stage is routinization, which includes the implementation of BCT (blockchain technology) solution, and the preparation for use, by setting up trial versions for technology approval of stakeholders and supply chain members.

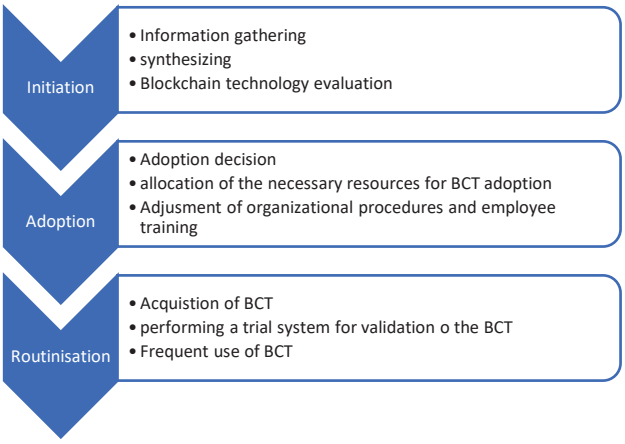


Figure 1: BCT adoption stages

2.2. Technology-Organization-Environment (TOE) Framework

To determine the factors that could impact the process of BCT adoption, we use the TOE framework, Developed by Tornatzky and Fleischer, its name comes from the three factors that this model claims to influence the stages of the technology adoption, i.e, technological, organizational, and environmental context.(Angeles 2012)

1. **The technological context:** it related to the organization's relevant technologies, as well as technologies used by trading partners and the potential technologies that the enterprise has the intention to adopt even if they are not set up in the enterprise. The relevant technologies could be material like for example the equipment and tools or immaterial as methods and data used
2. **The organizational context**: it includes the firm's equipment and resources such as the firm's size, administrative structure, business procedures, hierarchy, financial resources, human resources, turnover.
3. **The environmental context**: represents "the arena" in which the firm is operating, including its activity, its trading partners, and relations with governmental entities.

The TOE framework has been approved to be a suitable model for understanding IT integration factors. Hence it was used by IS researchers like for example: electronic data interchange (EDI), enterprise resource planning (ERP), e-business, e-commerce, green IT, hospital IS and Software-as-a-Service (Cruz-Jesus et al.,2019).
Even for the specific case of BCT, TOE already proved to be an interesting lens to have a holistic perspective of its requisition stages.
Lai-Wan Wong et al for example studied the adoption of blockchain in operations and supply chain management among Malaysian SMEs. To do that the authors grounded their conceptual model on the TOE framework, concluding that some BCT antecedents positively influence its adoption like for example competitive pressure whereas other factors like market dynamics did not prove to have any effect (Wong. Et al., 2020).
Simon Abrecht et al. proposed a theoretical model to shed light on BCT adoption in the energy sector. Their model combined some aspects of DOI (Diffusion of Innovation) with TOE framework to examine the dynamics relationships between blockchain technology and energy sector. Based on interviews with 22 experts in the domain of energy and blockchain they were able to determine constructs related to their theory and examines their influence on the use cases in question. (Simon et al., 2018).
They found that some energy services like for example grid services, microgrids and wholesale electricity trade are influenced by technological constraints whereas they noticed that they have a weak relationship with network-related and power-induced factors
Their model presents insights for decision makers in electric utilities and government administrations as they worked on the design of political and economic institutions for regulation of blockchain technologies.
However, they assumed that their study lacks generalizability because it is limited to the energy sector.
Gregor Schmitt et al. have performed an analysis of the advantages and barriers for organizations when smart contract which is a blockchain technology are integrated with Internet if things technology (IoT). Their study was grounded on interviews with researchers and industrial experts. The structure of their interview was structured following the TOE framework (Schmitt et al., 2019).
As a result, they determined 13 key-factors that affect the adoption within the TOE framework:

- Performance expectancy, Technology maturity, Perceived compatibility were identified as technological determinants
- Firm size, the attitude towards change, Organizational slack were among the organizational factors and
- Regulatory policy, Competitive pressure, Legal uncertainty were considered as environmental influencers

Thus, the TOE framework seems to be useful and interesting to understand BCT adoption process in the supply chain at firm level. Hence In the literature, multiple researchers have made it clear that technical context is not the only factor that influence BCT success and that organizational and environmental factors also impact BCT adoption success.

2.3. BCT application and its impact on supply chain performance:

BCT is defined as a fully distributed system that records and distributes transactional data between networked members. It is driven by rules that involved members have agreed to and secured by cryptography (Martins et al., 2016).
The chain refers to a sequence of data that involved actors maintain using a network. While the block represents the real time data that are updated by system actors.
In such a network, transparency is guaranteed, and traceability is enforced as the system maintain the entire history of transactions.

The benefits of BCT have been primarily examined in the cryptocurrency market over a decade ago. Nowadays multiple applications of blockchain technology are under study in multiple domains.
Thakur et al. (2020) also worked on the adoption of blockchain technology for land titling in India which demonstrated the interest as well as the barriers in the case of absence of internet infrastructure. (Thakur et al. 2020)
Damiano Di Francesco Mesa et al. in their work have surveyed five other applications of blockchain technology not related to cryptocurrencies which are : end-to-end verifiable electronic voting, identity management systems, access control systems, healthcare records management, decentralized notary and supply chain management. (Mesa et al., 2016).
For each of the cited applications, they analyzed the related issues and the potential opportunities brought by blockchain technology.
In the context of supply chain as proved in several studies, blockchain technology have the potential to remodel and enhance the performance of the processes of supply chain as it offers provenance of information which could reduce expected risks and also simplify the complexity of supply chains by limiting the use if intermediaries thus, cost reduction and valuable information protection.
(Wong. Et al., 2020) have also pointed out the benefits of blockchain technology in supply chain operations which are increasing efficiency and decreasing waste and costs.

3. CONCEPTUAL MODEL

Former studies have pointed out the necessity of customizing models borrowed to cater for the era of a specific technology. The same when we opt for the TOE framework to explore BCT adoption in supply chain at firm level, we pay attention to the specific context of blockchain technology and set up the parameters according to blockchain's specificity. Figure 1 shows our conceptual model. Each of the variables and suggested relationships is discussed in this section.

3.1. Technological context

Firstly, we analyze the influence of the technological context on BCT adoption process in terms of organizational IT competence and BCT characteristics.
Organizational IT competence:
Organizational IT Competence refers to the "organization's ability for IT-based innovation ". Former studies have identified several determinants of IT competence, which are (1) IT Infrastructure includes technologies, systems and applications used by the organization. (2) Human IT resources refers to people working in the organization who have the skills to integrate and use technological solutions and lastly (3) IT partnerships. These factors have been identified as playing a crucial role at firm's level to evaluate, adopt and implement technologies and IT-based infrastructure. For example, it is proved that firms with a strong IT infrastructure and flexible human IT resources could easily integrate new technologies with little risks and costs. Also, firms with a robust partnership between IS and business managers can facilitate the technology adoption by decreasing the hesitancy and skepticism from business units. Thus we believe that IT competence would be a crucial factor during the BCT adoption in SC at firm level especially when the technical immaturity was always the biggest obstacle for organizations to implement new technology in general and to conduct BCT activities in specific. Note that BCT entails a wide range of services (smart contracts, Public (permissionless) blockchains, Private (permissioned) blockchains …) which requires technological abilities from the supply chain actors to take advantage of its advantages. The impact of IT competency, however, could be different among the stages of adoption process. Indeed, it can be considered as a method that support the preparation of the technology infrastructure, even if it was just to have a basic level of knowledge about the new technology. However, we consider that for the two first stages (initiation and adoption) a firm's IT competency may directly influence the way that the enterprise evaluates BCT. In fact, a strong IT infrastructure with a competent IT human resources and smooth IT-business partnership could promote the effective use of resources for evaluation and implementation of BCT.
Specially, IT competency may have a direct effect on the determination of the availability of resources for BCT technology implementation project and their allocation for the project. It is also assumed by researchers that technology competence helps to understand the technology and perceive clearly the benefits derived from the adoption of BCT. It could also determine the related activities like for example training programs and procedures update. However, we believe that Firm's IT competency doesn't affect directly the supply chain network actors personal motivation to admit and continuously use the BCT, which shows that it has a little effect on the last stage of BCT adoption which routinization.
Grounded on the above analyze we propose that:

P1: Organizational IT competence will have positive impacts on BCT-SC initiation and adoption stages.

According to a survey study done over the last 16 research resources about blockchain technology adoption. Table 1.1. summarize specific variables according to the number of times that were found to be significant in several blockchain studies based on TOE framework.
Based on this work we take into consideration the most relevant variables into this study.

Technological considerations	Organizational considerations	Environmental considerations
Perceived benefits 10	Organisational readiness[1] 12	Regulatory environment[2] 11
Complexity 10	Top management support 8	Market dynamics[3] 9
Compatibility 8	Organisational size 8	Industry pressure[4] 5
Data security 6	Business model readiness 4	Government support 5
Maturity 5	Technology readiness 3	Business use cases 3
Relative advantage 4	Innovativeness 2	Trading partner support 3
Disintermediation 4	Participation incentives 1	Critical user mass 1
Smart contract coding 2	Blockchain Knowledge 1	
Architecture 1		
Permissions (public vs private) 1		

[1]Includes value chain readiness; [2] Includes government regulation; [3]Includes competitive pressure [4]Includes industry standards.

Table 1. Summary of significant blockchain adoption consideration. (Cleohessy et al., 2018)

BCT Characteristics:

Grounded on a comprehensive literature review about the perceived characteristics of blockchain technology on the adoption has been widely studied.

According to Clohessy et al. three characteristics of blockchain technology that is, perceived benefits, complexity and compatibility are significantly associated with its adoption (leohessy et al., 2018).

Based on this perspective, we posit that the perceived benefits, compatibility, and complexity of a certain blockchain influence its adoption process.

Perceived benefit: Drawing from the literature we define Perceived as the potential benefits derived from using a specific BCT in supply chain. Effectively when integrated in the supply chain processes, Firms that implement BCT could benefit from many advantages such as transparency, security, traceability.

According to a Malaysian study which aims to investigate the effects of TOE based variables, which conducted an empirical study over 194 SMEs in Malaysia (Wong. Et al., 2020). The results approved that perceived benefits has a significant relationship in determining blockchain adoption and this is concordant with several studies on adoption considerations, especially with Wand et al. (2019) who confirmed through their work that perceived benefits would be considered as the main reason that blockchain is significant in supply chains (Cleohessy et al., 2018).

However, the benefits can be viewed from two distinctive levels, which are, organizational level and individual level. In fact, the expected advantages by organizations and employees may not be the same, that is why we believe that its impact may vary through BCT adoption stages as following:

- Organizational level: perceived benefits may have a positive impact on the adoption stage at this level because it can drive the firm's decision to adopt BCT and adjust its infrastructure to this new initiative.
- Individual level : we believe that individual level perceived- benefits may have a positive impact with the routinization stage because supply chain actors would be more encouraged to use blockchain technology when they will be aware of the usefulness of the system to their work.

Based on these arguments, we propose that:

P2a: BCT perceived benefits at the organizational level will have positive impacts on BCT adoption stage.
P2b: BCT relative advantage at an individual level will have positive impacts on BCT routinization stage.

Complexity: represents how much blockchain technology is challenging and difficult to use by supply chain actors. The complexity of BCT is considered as a big issue for potential adopters because it has a direct impact on how much human resources should be engaged and the extend of the effort that should be invested for adapting procedures and IT infrastructure especially in our case which treat the integration of BCT in the supply chain because it involves multi-party collaboration (Wong. Et al., 2020).

Former studies have also pointed out the strong relativity between adoption intention and the extent of complexity of using a new technology (Cruz-Jesus et al.,2019).

According to the Malaysian study they also found that complexity clearly create a big inhibitor for blockchain adoption in SC at firm level, with these arguments, the following proposition is formulated accordingly:

P3a: BCT-SC complexity will have negative impacts on BCT adoption

Furthermore, it is approved that since the technology is complex, its use by employees would be difficult and they will be confused and anxious which could impact negatively the time tasks take and job performance Consequently the complexity of blockchain technology will in

turn adversely influences whether or not employees could achieve the routinization stage (Çolak et al.,2020)
Based on these arguments, we propose that:

P3b: BCT-SC complexity will have negative impacts on BCT routinization stages

Compatibility: is defined as the ability of blockchain technology to be integrated with already existing infrastructure. Researchers believes that more the new technology is compatible in the firm's context, more the doubt about its adoption will decrease. (Chen; Gao., 2017). Several studies have documented that some enterprises considered only the benefits that the technology could bring but neglected whether the system was compatible with their business practices. As a result, is the case of blockchain technology adoption in supply chain could not achieve continuous usage by employees. However, by taking into consideration this compatibility issue, enterprises could achieve successful adoption and continuous use of blockchain technology by supply chain actors.
Based on these arguments, we propose that:

P4: Blockchain technology compatibility will have positive impacts on KMS adoption and routinization stages.

3.2. Organizational context :

Top Management Support (TMS):
Considered by researchers as one of the organizational contexts that have more influence on IT outsourcing (Cruz-Jesus et al.,2019).Top management support (TMS) refers to how extent the adoption of a new technology "Blockchain in our case" is supported by managers of the firm.
This determinant has been pointed out by several studies of technology adoption especially when those technologies are disruptive and involved in the transformation of the business processes of the firm. Indeed, many researchers confirmed statistically that TMS is significant to support and evaluate technology adoption. Although in the context of supply chain management Hsiu-Fen Lin approved in their study about the determinants of electronic supply chain management system adoption, that TMS is a key determinant of the likelihood and extent of e-SCM adoption. (Lin.2014) Considering BCT's characteristics, e.g. high financial costs, and the potential to revolutionize the way an organization manage its supply chain, it may especially depend on TMS.
However, Lai-Wan et al. in their empirical study about, BC implementation in SC at firm level Found that TMS is insignificantly related to BCT adoption which was not convincing according to them because they believe that BCT in Malaysia where the study was conducted is still in its infancy which mean that managers lacks of knowledge about the technology to support it but they would be more likely to have a positive behaviors and support it when they will be more knowledgeable about it. In fact BCT is a radical IT that alters IT existing business models and procedures (Wong. Et al., 2020).
Hence high BCT adoption requires TMS, because, the opinions and behaviors of top management can encourage supply chain actors to participate and resolve potential conflicts among SC stakeholders, especially when it comes to allocating needed resources and making adjustment of business procedures Hence, TMS support may be a significant driving force in the last stage of adoption (routinization). Furthermore, Top management's agreement toward influence the choice of a specific BCT adoption which may directly dictate how the firm perceives opportunities and barriers and eventually how it evaluates BCT application in supply chain… Hence TMS have an important influence throughout all the stages of blockchain adoption process in the supply chain.
Therefore, we propose that:
P5: *Top management support toward BCT will have positive impacts on BCT initiation, adoption, and routinization stages*

3.3. Enviromental context

Competitive pressure (CP):
According to Schuetz and Venkatesh (2019), environmental factors provide insight into how blockchain technology initiatives can overcome some of the challenges such as high monetary and time costs. The environmental factor considered in this study is the competitive pressure. (Schuetz and Venkatesh, 2020)
Competitive pressure refers to the degree of pressure felt by a firm from its rivals which is recognized by academics and practitioners as a crucial driver in the adoption of a new technology (Cruz-Jesus et al.,2019).
According to the empirical Malaysian study, the impact of competitive pressure on SME's appears among the most top four significant that determine the adoption of BCT in SC at firm level, which means that SME's goal to stay competitive in their business environment could be achieved by the acquisition of technological innovations.
As mentioned earlier, one advantage of taking into consideration different adoption stages in our analyze is to differentiate influence through the adoption stages. Although CP has positive effects on evaluation and adoption stages, it can also bring negative impacts on the routinization stage. In fact, some organizations lack of technical and managerial skills to meet innovation technology requirement. Moreover Frederico Cruz-Jesus et al confirmed in their work that too much CP would push firms to change from a technology to another before effectively implementing the first technology in the firm .
Accordingly, we believe that too much CP impact negatively BCT routinization and might probably be an inhibitor. Thus, we suggest the following proposition:

P6. *Competitive pressure positively influences BCT evaluation and BCT adoption, but negatively influences BCT routinization.*

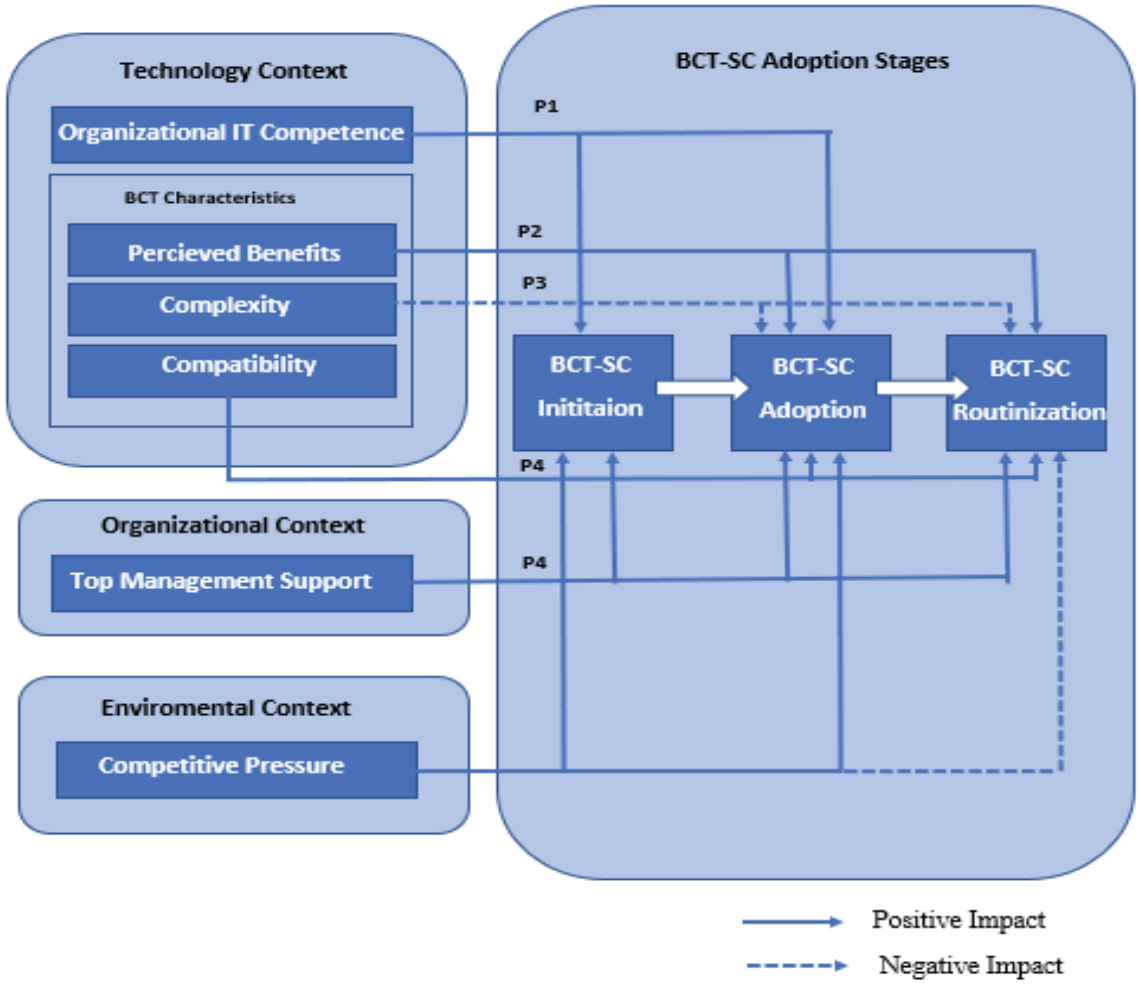


Figure 2: Structural model results of CRM adoption stages.

4. CONCLUSION

This study proposes an integrated framework to examine how the technology organization, and environment) factors affect BCT adoption in SC at firm level. In particular, the study highlights the roles of technical characteristics of BCT, such as perceived benefits, complexity, and compatibility in explaining the impacts of those factors on each of the stages of BCT diffusion process in SC.
Regarding their impacts there should be a variation among the way they impact BCT adoption stages.
Our paper has several significant implications. First the work suggests a holistic view of BCT adoption process stages and variables that could affect the stages involved in the process.

Therefore, the analyse enables practitioners to understand the critical determinants of concern, in implementing BCT on SC in their enterprises. Through this study, we have proposed a conceptual model of BCT integrated Supply Chain adoption process through three stages.
We also adopted the TOE framework to frame the determinants that impact the three stages of BCT-SC diffusion within enterprises. The proposed framework will benefit enterprises who are planning to initiate a BCT and who are confronting difficulties in certain stages of their BCT-SC diffusion. Especially the framework points out areas for management attention in each stage of the BCT adoption process.
By offering a deeper understanding of their potential customers, our study model can also help BCT system

vendors who would like to take an edge over their rivals in supply chain sector. Moreover, this study will serve as a base for further empirical studies with the possibility of conceptual extensions. As the TOE Framework could be extended by exploring the potential influence of other factors. For example, another organizational determinant as firms' size or organizational readiness. Incorporating other significant factors into account will make our conceptual model more comprehensive and more predictive.

REFERENCES

Albrecht Simon, Reichert Stefan, Schmid Jan, Strüker Jens, Neumann, Dirk,Fridgen, Gilbert (2018) Dynamics of Blockchain Implementation –A Case Study from the Energy Sector. Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences.

Caetano Haberli Junior, Tiago Oliveira, Mitsuru Yanaze, (2019) "The adoption stages (Evaluation, Adoption, and Routinisation) of ERP systems with business analytics functionality in the context of farms, Computers and Electronics in Agriculture", Volume 156, January 2019, Pages 334-348

Clohessy T., Acton T., Rogers N. (2019) Blockchain Adoption: Technological, Organisational and Environmental Considerations. In: Treiblmaier H., Beck R. (eds) Business Transformation through Blockchain. Palgrave Macmillan, Cham

Çolak, Murat et al. 'A Multi-criteria Evaluation Model Based on Hesitant Fuzzy Sets for Blockchain Technology in Supply Chain Management'. 1 Jan. 2020 : 935 – 946.

Damiano Di Francesco Maesa, Andrea Marino, Laura Ricci. (2016) Uncovering the bitcoin blockchain: an analysis of the full users graph.

Eunju Ko, Sook Hyun Kim, Myungsoo Kim, Ji Young Woo (2007), Organizational characteristics and the CRM adoption process, Journal of Business Research 61 (2008) 65–74
Eunju Koa, Sook Hyun Kim, Myung soo Kim, Ji Young Woo, Organizational characteristics and the CRM adoption process, (2008). Journal of Business Research. Volume 61, Issue 1, January 2008, Pages 65-74

Frederico Cruz-Jesus, Andreia Pinheiro, Tiago Oliveira (2019) Understanding CRM adoption stages: empirical analysis building on the TOE framework. Computers in Industrey 109 (2019) 1-13

Gregor Schmitt , Andreas Mladenow, ChristineStrauss, Michaela Schaffhauser-Linzatti (2019) Smart Contracts and Internet of Things: A Qualitative Content Analysis using the Technology-Organization-Environment Framework to Identify Key-Determinants. Procedia Computer Science. Volume 160, 2019, Pages 189-196

Hsiu-Fen Lin. (2014) Understanding the determinants of electronic supply chain management system adoption: Using the technology–organization–environment framework. Technological Forecasting and Social Change. Volume 86, July 2014, Pages 80-92

Ing-Long Wu, Jian-Liang Chen (2014), A stage-based diffusion of IT innovation and the BSC performance impact: A moderator of technology–organization–environment. Technological Forecasting and Social Change Volume 88, October 2014, Pages 76-90

Lai-Wan Wong, Lai-YingLeong Jun-Jie Hew Garry Wei-Han Tan Keng-BoonOoi. (2020). Time to seize the digital evolution: Adoption of blockchain in operations and supply chain management among Malaysian SMEs.International Journal of Information Management. Volume 52, June 2020, 101997

M. Hader, A. Elmhamedi and A. Abouabdellah, "Blockchain Integrated ERP Fora Bette Supply Chain Management," 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Bangkok, Thailand, 2020, pp. 139-143, doi: 10.1109/ICIEA49774.2020.9102084.

M. Mettler, "Blockchain technology in healthcare: The revolution starts here," 2016 IEEE 18th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom), Munich, 2016, pp. 1-3, doi: 10.1109/HealthCom.2016.7749510.

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. 2008. (Accessed December 2018) https://bitcoin.org/bitcoin.pdf

Ngah, A.H., Zainuddin, Y. and Thurasamy, R. (2017), "Applying the TOE framework in the Halal warehouse adoption study", Journal of Islamic Accounting and Business Research, Vol. 8 No. 2, pp. 161-181.

Puklavec, B., Oliveira, T. and Popovič, A. (2018), "Understanding the determinants of business intelligence system adoption stages: An empirical study of SMEs", Industrial Management & Data Systems, Vol. 118 No. 1, pp. 236-261. https://doi.org/10.1108/IMDS-05-2017-0170

Quan Chen; Hong Gao (2017) Two chances forwarding in real-time routing for low-duty-cycle sensor networks International Journal of Sensor Networks (IJSNET), Vol. 24, No. 1, 2017

R. Angeles, "RFID supply chains of Purdue and Cephalon: Applying the TOE framework in seeking e-pedigree compliance," 7th Iberian Conference on Information

Systems and Technologies (CISTI 2012), Madrid, 2012, pp. 1-8.

Ranjit Bose Xin Luo. (2011) Integrative framework for assessing firms' potential to undertake Green IT initiatives via virtualization – A theoretical perspective. The Journal of Strategic Information Systems Volume 20, Issue 1, March 2011, Pages 38-54

Ricardo Martins Tiago Oliveir Manoj A.Thomas. (2016) An empirical analysis to assess the determinants of SaaS diffusion in firms. Computers in Human Behavior. Volume 62, September 2016, Pages 19-33

S. Chen, B. Guo, H. Yan, Q. Qin, B. Li and B. Qi, "Application and Prospect of Integrated Energy Interoperability Management System Based on Blockchain," 2019 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), Nanjing, China, 2019, pp. 421-425, doi: 10.1109/ICEI.2019.00080.

Samad M. E. Sepasgozar ; and Leonhard E. Bernold. (2012) Factors Influencing the Decision of Technology Adoption in Construction. International Conference on Sustainable Design, Engineering, and Construction 2012.November 7-9, 2012 | Fort Worth, Texas, United States.

Sebastian Schuetz, Viswanath Venkatesh. (2020) Blockchain, adoption, and financial inclusion in India: Research opportunities. International Journal of Information Management. Volume 52, June 2020, 101936

T. R. Vance and A. Vance, "Cybersecurity in the Blockchain Era : A Survey on Examining Critical Infrastructure Protection with Blockchain-Based Technology," 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 107-112, doi: 10.1109/PICST47496.2019.9061242.

Trevor Clohessy, Thomas Acton, Nichola Rogers. (2019) Blockchain adoption: Technological, organisational and environmental considerations. Business Transformation through Blockchain, pp.47-76

Trevor Clohessy, Thomas Acton. (2018) Blockchain Adoption: Technological, Organisational and Environmental Considerations. In book: Business Transformation through Blockchain, Edition: Volume1, Chapter: 2, Publisher: Palgrave Macmillan, pp.47-76

Vinay Thakur, M.N. Doja, Yogesh K.Dwivedi, Tanvir Ahmad, Ganesh Khadangae. (2020) Land records on Blockchain for implementation of Land Titling in India International Journal of Information Management
Volume 52, June 2020, 101940.

Y. Zhang, S. Deng, Y. Zhang and J. Kong, "Research on Government Information Sharing Model Using Blockchain Technology," 2019 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME), Qingdao, China, 2019, pp. 726-729, doi: 10.1109/ITME.2019.00166.

OPTIMAL DESIGN OF A LEASED VEHICLE FLEET WITH CONSIDERATION OF MAINTENANCE AND ENVIRONMENTAL CONSTRAINTS

Malek BEN MECHLIA, Jérémie SCHUTZ, Sofiene DELLAGI

LGIPM
University of Lorraine
Metz, France
malek.ben-mechlia@univ-lorraine.fr
jeremie.schutz@univ-lorraine.fr
sofiene.dellagi@univ-lorraine.fr

Anis CHELBI

CEREP
University of Tunis. ENSIT, Tunis, Tunisia
anis.chelbi@planet.tn

ABSTRACT: *In this paper, we are interested in designing a fleet of vehicles made of two types (fuel and electric), which will be leased to achieve a set of transportation missions during a maximum period of time. A mathematical model is developed in order to determine the number of vehicles of each type to be leased, the number of months of use of each vehicle and the preventive maintenance period for each one. The objective is to minimize the expected total cost including leasing, operation, preventive and corrective maintenance, and environmental impact. An illustrative example is provided and numerical results are presented and discussed.*

KEYWORDS: ***Leasing, logistics, vehicle fleet, maintenance, environmental constrains.***

1 INTRODUCTION AND LITTERATURE REVIEWS

This paper deals with the selection of the types and the number of vehicles to be leased by logistics departments to achieve transportation missions. This decision is not an easy one given the diversity of vehicles on the market, each one involving specific parameters such as the type (fuel, electric, or hybrid), reliability, costs related to leasing, operation, maintenance, and environmental impact. Due to significant changes in the environmental impacts legislation, the logistics service providers have to take these incremental changes into account. Consequently, it is important to think about the right choice of transportation means and take them into consideration when designing a logistics network, which provides a comprehensive visibility and control. Logistics costs are usually computed according to the type of means of transport as well as the quantity transported, the distance traveled, and the penalty costs caused by delays. (Benoist et al., 2010) deal with the vehicle routing problem combined with inventory management in order to minimize logistics costs. The authors demonstrated that their model could reduce costs by 20 % compared to what was done by experts in the field of logistics. (Mtalaa et al., 2010) proposed a mathematical model that minimizes the effects of carbon dioxide. They then proposed an alternative model that minimizes the overall economic costs of the supply chain i.e. the direct traditional logistics costs, in closed loop and the costs of reverse logistics. These costs are considered in the paper as external transport costs. Similarly, (Sawadogo et al., 2010) focused on the integration of environmental and societal impacts in an intermodal transport network. The aim of their work is to determine the most efficient path to minimize transport costs, transport time and the various environmental and societal impacts. The criteria used for decision making are the following: economic cost, transport time, air pollution, energy consumption, noise pollution, damage due to transshipments and risk of accidents. They presented each criterion using a mathematical model. The specificity of this approach lies in allowing the link between the environmental impacts emanating from the means of transport and their estimated costs.

To address the problem of integrating maintenance into transport logistics, (Ben Mechlia et al., 2018) presented a motivational and bibliographic study on the selection of the best transportation means in order to ensure the supply of customers depending on the type of merchandises. Moreover, they presented works that deal the reliability and maintenance strategy for several types of transportation means, while pointing out that little work addressed the integration of maintenance and logistics. Further (Troudi et al., 2015) worked on the influence of road type and the weather conditions on vehicle failure rates. In fact, they sequentially established the optimal number of preventive maintenance actions to be performed on the vehicle as well as the optimal distance to be travelled. Furthermore, (Rezg et al., 2014)

considered one type of vehicle required to carry out a set of tours during a deterministic period. The different circuits to be carried out are characterized by the time required to complete a tour as well as their road types. Each tour generates a process of vehicle degradation, which reduces the profit generated by the tour, which can cause failures where the maintenance cost increases rapidly. They developed a mathematical model that minimizes the cost of transport between different elements of the logistics network, as well as the road cost, and the cost of maintenance actions.

Regarding the choice of vehicles by type, (Turki and Rezg, 2016) studied a manufacturing system with transport activities in urban area. The authors considered two cases for the transportation of the products from the warehouse to the customer. In the first case, the transport is performed by an electric vehicle and in the second case by a fuel vehicle. They presented a model that allows the manufacturer to decide to use fuel or electric vehicle based on transportation, maintenance costs and the cost of carbon penalty. Two simulation algorithms based on discrete events are used for each type of vehicle to compare total costs and then provide a decision. Furthermore, (Prud'homme and Koning, 2015) performed a comparative study between an electric and a fuel vehicle taking into account the negative environmental impacts generated by the vehicles. They have a model to estimate the costs of an electric vehicle, compared to a similar fuel vehicle, as well as the CO_2 emission. These magnitudes are a function of a dozen parameters, such as purchase cost, electrical efficiency, the cost of the battery, the price of electricity, CO_2 content of electricity (for the electric vehicle), the purchase cost, the efficiency and price of fuel, the costs of local pollution, CO_2 emission (for the fuel vehicle), as well as the lifetime of the vehicle and the mileage travelled. The methodology adopted is a comparative study between an electric vehicle and a fuel vehicle providing approximately the same level of service during the same period. It does so from three important points of view: costs to the consumer, socio-economic costs and CO_2 emissions.

Management of vehicles leasing has attracted the attention of several researchers. For example, (Balcik et al., 2015) proved in their study how the UN High Commissioner for Refugees (UNHCR) has successfully improved its vehicle fleet management through the introduction of an Internal Leasing Program (ILP). The authors compared the fleet performance indicators before and after implementation of the (ILP). They indicated that the introduction of the (ILP) has positively impacted the fleet management by reducing procurement costs, fleet size and the average age of the fleet. Thanks to the use of the (ILP), a decrease of the fleet size by 11% has been realized between April 2013 and October 2015.

Dealing electric vehicles leasing, (Miao et al., 2018) proposed a comprehensive pricing for a Chinese electric vehicle lease company in order to optimize the annual operations profit for vehicle lease service based on mileage-based pricing (MBP). The profit introduced by authors integrated the revenue and the maintenance costs. In order to reach this objective, the authors developed a differential pricing strategy. In addition, an enumerative algorithm is proposed in order to determine the optimal pricing and examine the influence of some parameters on the optimal profit. The authors proved through the use of the differential pricing strategies, a significant increased profit (between 2.3% and 69.8%).

Looking at the literature related to fleet vehicles sizing or comparison between several types of vehicles in logistic problems, the simultaneous consideration of a vehicle fleet size while considering maintenance and environmental impacts in the context of leasing, has not been studied in depth to highlight the strong interaction between these aspects.

The specificity of our study consists in designing a fleet of vehicles made of two types (fuel and electric), which will be leased to achieve a set of transportation missions during a maximum period of time. This is done taking into account the environmental impact, the maintenance of the vehicles and their availability.

The paper is organized as follows. The description of the problem is presented in section 2. In section 3 we provide the mathematical model with the working assumptions and the used notation. In section 4 we propose a numerical example, an analytical result is presented in the same section to understand and ensure the performance of the model developed and solved with MATLAB software. Finally, the last section concludes the paper and gives some perspectives to our work.

2 PROBLEM DESCRIPTION

Generally, deliveries have to be made to customers scattered over a very large area (different cities on a continent) and the vehicles must therefore be available for distribution.

In such situations, breakdowns are likely to occur at any time on the way between two recipients and repairs can last more or less time causing sometimes important delays and consequently significant penalties. Today, the impacts of transportation mean on the environment are well known and include global warming, deterioration of the ozone layer, dispersion of organic and inorganic toxic substances, and the landscapes degradation. In fact, the gaseous emissions are responsible for respiratory diseases, environmental damage and visibility problems, such as the fog. Therefore, to protect the environment, all companies must find solutions to control gas emissions as well as those of other toxic products. In addition, the logistics sector has experienced a significant growth. This growth has been marked by a negative impact on the environment, which has led governments to establish laws and requirements such as the (Kyoto protocol, 1998) and the (ISO 14001, 2015). This standard sets an efficient framework for the company to move towards an environmentally efficient system.

This study focuses on the case of a logistics company that wants to lease a commercial vehicle fleet in order to satisfy a well-defined mission. More precisely, the present study was particularly motivated by the determination of the optimal number of two types of vehicles to lease (fuel and electric), in order to satisfy customers and meet delivery schedules. This objective will be reached by minimizing the expected total cost integrating leasing, operation, environmental impact, and maintenance costs.

3 THE MATHEMATICAL MODEL

3.1 Notation

The following notations are used in the mathematical formulation of the model:

- ✓ T_{Max}: Period during which the mission has to be performed (months)
- ✓ N: Number of vehicle types, with i is considered the type of vehicle $i \in \{1, \dots, N\}$
- ✓ K : The minimum total number of kilometers to be traveled by all types of vehicles (kms)
- ✓ C_{Li}: The leasing cost of a vehicle of type i (cost fixed by the lessor) (m.u/month)
- ✓ C_{Oi}: Operating cost of a vehicle of type i (m.u)
- ✓ C_{Mi}: Expected total maintenance cost for a vehicle of type i (m.u)
- ✓ C_{Ei}: Expected cost of environmental impact for a vehicle of type i (m.u)
- ✓ C_{MCi}: Cost of corrective maintenance action for vehicles of type i (m.u)
- ✓ μ_{ci}: The average duration of a corrective maintenance action for a vehicle of type i (months)
- ✓ C_{MPi}: Expected cost of preventive maintenance (PM) for a vehicle of type i (m.u)
- ✓ μ_{pi}: The average duration of a preventive maintenance for a vehicle of type i (months)
- ✓ v_i: The average usage rate associated with a vehicle of type i (kms/month)
- ✓ T_i: The possession duration of each leased vehicle of type i (months)
- ✓ T_{min} : The minimum period for leasing vehicles of type i (months)
- ✓ $\emptyset(Y_i, m_i)$: The average number of breakdowns (minimal repairs) over a period of use of a vehicle of type i for a given PM period μ_{pi}
- ✓ $\lambda_i(\cdot)$: The failure rate function of a vehicle of type i
- ✓ $\lfloor . \rfloor$: Rounds to the nearest inferior integer
- ✓ $\lceil . \rceil$: Rounds to the nearest superior integer

The decision variables are defined as follows:

- ✓ X_i : Number of vehicles to lease of type i, $i \in \{1, \dots, N\}$, with $X_i \in \mathbb{N}$
- ✓ Y_i: Number of months of use of each leased vehicle of type i, $i \in \{1, \dots, N\}$, with, $Y_i \in \mathbb{N}$
- ✓ m_i : Preventive maintenance period to be adopted for a vehicle of type i (months) with $m_i \in \mathbb{N}^*$

3.2 Working assumptions

The following assumptions are considered:

- ✓ Two types of vehicles are considered (fuel and electric vehicles).
- ✓ Each type of vehicle will travel a $(Y_i \,.\, v_i)$ number of kilometers.
- ✓ The renter of vehicles will ensure the maintenance of each vehicle.
- ✓ The leasing cost of vehicles depends on the type, agency and duration.
- ✓ The renter is in charge of renewing the batteries

3.3 The objective function and constraints

Our objective consists in minimizing an objective function of cost including the leasing, the operating, the maintenance, and the environmental impact costs according to variable decisions; which are the number of vehicles to lease by type i (X_i), the number of months of use for one leased vehicle of type i (Y_i) and the periodicity of a preventive maintenance action associated to the leased vehicle (m_i) in order to ensure K kilometers during a specified period (T_{max}) with a fixed mean usage rate (v_i) for each type. We start by developing analytically the objective function which will be optimized in order to determine the optimal decision variables. We also presented the constraints which will be respected.

The expected total costs are as follows:

$$min \sum_{i=1}^{N} X_i . (C_{Li} . T_i + C_{Oi} + C_{Mi} + C_{Ei}) \quad (1)$$

3.3.1 Detailed constraints

The constraints of the objective function are defined as follows:

$$\sum_{i=1}^{N} X_i . Y_i . v_i \geq K \quad (2)$$

$$T_i \leq T_{max} \; \forall \; i = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$T_i \geq T_{min} \; \forall \; i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$Y_i \leq 1_X \,.\, \min\left(T_{max} \,,\, \frac{K}{v_i}\right) \; \forall \; i = 1, \dots, N \quad (5)$$

We recall that the objective function (1) minimizes the sum of leasing, operating, maintenance and environmental impact costs; whereas, constraint (2) ensures that the number of kilometers traveled by the all vehicles must be greater than or equal to the minimum total number of kilometers (K) to be traveled by all types of vehicles. Constraint (3) ensures that the possession duration of each vehicle of type i (T_i) is shorter than or equal to the period during which the missions have to be performed (T_{max}). Constraint (4) denotes that the possession duration of leased vehicles of type i (T_i) must

be greater than or equal to the minimum period for leasing vehicles of type *i* (T_{min}). This constraint ensures the long-term lease of vehicles as well as a minimum leasing cost. Constraint (5) ensures that the number of months of use for one leased vehicle of type *i* (Y_i), will be 0 if no vehicle of this type is leased.

3.3.2 The leasing cost

The leasing cost represents an important parameter in our work. It is obtained by the product of the unit leasing cost (proposed by the lessor) and the possession duration of each leased vehicle of type i ($C_{Li}.T_i$). In fact,(T_i) includes the number of months of use of each leased vehicle of type i (Y_i) and the average duration of all corrective and preventive maintenance actions performed on the vehicles. It is expressed as follows:

$$T_i = \left[Y_i \,.\, \emptyset(Y_i, m_i).\mu_{ci} + \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor . \mu_{Pi} \right] \qquad (6)$$

Moreover, we consider in our study two types of vehicles to lease (fuel ($i = 1$) and electric vehicle ($i = 2$)). Therefore, the leasing cost is different between the two types.

We consider that the leasing cost of vehicles depends on the type of the vehicle, the leasing agency and the lease duration. It is negotiable. Based on data from rental agencies, we propose in Table 2 the leasing costs of vehicle for each type *i*. Indeed, these costs are proposals for a long leasing duration and they do not include the operating, maintenance and environmental impact.

3.3.3 The expected maintenance cost

We adopt a strategy of an imperfect periodic preventive maintenance with minimal repair at failures; known in the literature (Gertsbakh 2000) and used by (Gouiaa-mtibaa et al., 2018). More precisely a PM action is performed for vehicles of type *i* after each m_i kilometers. The model assumes that, after each PM action, the failure rate is decreased to a certain extent and the failure rate function is then increased by a certain coefficient that can be determined empirically. Minimal repairs take place whenever failures are detected between PM actions to restore the system into the operating state without changing its failure rate function.

In our work, the number of PM actions is the ratio of the number of months of use of each leased vehicle of type *i* (Y_i) and the periodicity of a PM action associated to the leased vehicle of type *i*; $\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor$.

Adapting the model proposed by (Gertsbakh 2000) to our study, the average number of breakdowns (minimal repairs) $\emptyset(Y_i, m_i)$ is expressed in the following way:

$$\emptyset(Y_i, m_i) = \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor} \int_0^{m_i} e^{(j-1).\alpha} \,.\, \lambda_i(x)dx + \int_0^{Y_i - \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor . m_i} e^{\left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor . \alpha} . \lambda_i(x)dx \qquad (7)$$

It is easy to see in equation (7), that PM actions induce a reduction in the failure rate. However, the average number of breakdowns is increased, between PM actions, by a "degradation" factor (e^{α}) where α represents a positive parameter to be determined empirically.

The total maintenance cost is expressed in the following way:

$$C_{Mi} = C_{MCi} \,.\, \emptyset(Y_i, m_i) + C_{MPi} \,.\, \left\lfloor \frac{Y_i}{m_i} \right\rfloor \qquad (8)$$

3.3.4 The expected operating cost

The operating cost is obtained according to the use of leased vehicles of type *i* during their operation duration. We refer to the literature in order to formulate the operating cost for each type:

Fuel type. The fuel vehicle is characterized by its fuel efficiency, which is the number of kilometers driven per unit of fuel consumed (km/liter). Efficiency and productivity are generally defined as an (output/input) ratio and increases in productivity or efficiency are considered desirable. This is in conflict with the European standards of measuring the performance of a fuel vehicle in liter/100 km or in kWh/100 km for electric vehicle (but not with the US standards of measuring it in miles/gallon). Based on the formulation developed by (Prud'homme and Koning, 2012), the efficiency is therefore considered as the inverse of the definition commonly used in Europe. The following equation (9) presents the operating cost for fuel vehicle ($i = 1$):

$$C_{O1} = C_{u_diesel} . \left(\frac{Y_1 . v_1}{eff_1} \right) \qquad (9)$$

With :

- ✓ C_{u_diesel} : Unit cost of fuel (m.u/liter)
- ✓ Y_1 : Number of months of use of each leased fuel vehicle (months)
- ✓ v_1 : the usage rate associated to the leased fuel vehicle (kms/months)
- ✓ eff_1 : Fuel efficiency (km/liter)

Electric type. The operating of an electric vehicle is characterized by the electric consumption (the recharge cost and the battery autonomy).
Usually, the driver of this vehicle must lease a battery or buy a new battery just at the end of its service life. Thus, the lessor of this vehicle type supports of the battery leasing or purchase. The user pays only the leasing cost. Therefore, we have developed the operating cost of electric vehicle.

The following equation (10) presents the operating cost for electric vehicle ($i = 2$):

$$C_{O2} = C_{ch}.\left\lfloor\frac{Y_2.v_2}{\theta}\right\rfloor + c_{unit}.\left\lfloor\frac{Y_2.v_2}{\theta.Nb_{MaxCh}}\right\rfloor \quad (10)$$

With:

- ✓ C_{ch} : The unit cost of a battery recharging (m.u)
- ✓ Y_2 : Number of months of use for one leased electric vehicle (months)
- ✓ v_2 : The usage rate associated to the leased electric vehicle (kms/month)
- ✓ θ : The battery autonomy (kms)
- ✓ c_{unit}: The unit cost of a battery for an electric vehicle (m.u)
- ✓ Nb_{MaxCh} : The maximum number of recharging

3.3.5 The expected environmental impact cost

We consider the emission of CO_2 is an important factor in the proper use of vehicles and the respect of environment, therefore a mathematical model on the cost of CO_2 emission is considered in our objective function as essential negative environmental impact. Based on the work of (Prud'homme and Koning, 2012), we propose the following equation that represents the cost of impact environmental calculated from the quantity of CO_2 emitted by the vehicle of type *i* multiplied by its unit cost. In fact, the unit cost of CO_2 is not the same in the world but can change between countries. Therefore, we used in our work the unit cost defined in the work of (Ba et al., 2016).

The impact environmental impact costs are given by:

$$C_{Ei} = CU_{CO2}.Y_i.v_i.g_i.\left(\frac{1}{eff_i}\right) \quad (11)$$

With:

- ✓ CU_{CO2} **:** The unit cost of CO_2 (m.u/kg)
- ✓ Y_i **:** Number of months of use for one leased vehicle of type *i*
- ✓ v_i **:** The usage rate associated to the vehicle of type *i* (kms/month)
- ✓ g_i **:** CO_2 emission in (kg/liter) for fuel vehicle ($i = 1$) and in (kg/kWh) for electric vehicle ($i = 2$)
- ✓ eff_i **:** The energetic efficiency (number of kilometers traveled per liter for fuel type (km/liter) or per kilowatt-hour for electric type (km/kWh)

4 NUMERICAL EXAMPLE

We conducted many computational experiments using the numerical resolution with MATLAB software (Version 2019a). We present in this section an illustrative example and show the obtained results.

4.1 Experiments input

For our numerical example, we used the values given in the following Tables 1 and 2.

Parameters	Numerical input data
K (kms)	10 000 000
T_{max} (months)	60
T_{min} (months)	24
CU_{CO2} (m.u/kg)	0.05
α	1.05

Table 1: Numerical input data

	Fuel vehicle (i=1)	Electric vehicle (i=2)
C_{li} (m.u/month)	250	260
C_{MCi} (m.u)	250	300
C_{Mpi} (m.u)	60	80
v_i (kms/month)	16 800	16 800
eff_i(kms/liter)	20	5
C_{u_diesel} (m.u/liter)	1.5	-
g_1 (kg/liter)	2.6	-
g_2 (kg/kWh)	0.09	-
C_{ch}(m.u)	12.50	-
c_{unit}(m.u)	-	6000
Nb_{MaxCh}	-	2000
θ (kms)	-	160

Table 2: Numerical input data for fuel and electric vehicle

Table 2 shows the input parameters used by type of vehicle (fuel and electric). In our study, we suppose to realize at least K kilometers with a same usage rate associated with each vehicle of type i (v_i) during 60 months (T_{max}). During this period, the missions have to be performed while obviously taking into account the environmental impact for which the nuisance caused by 1 kg of CO_2 emitted into the air is estimated to 0.05 m.u/kg by (Ba et al., 2016).

Point of view reliability, we assume that the type of vehicle has an increased failure rate following Weibull distribution with (shape parameter $= 2$) and (scale parameter $= 25$) for fuel vehicle and (scale parameter $= 30$) for electric vehicle. The durations of maintenance actions follow an exponential distribution with an average of 1 day for repairs (μ_{ci}) and a mean of 0.5 day for PM (μ_{Pi}), regardless of vehicle type.

Regarding the energetic efficiency and the CO_2 emissions, we use the same parameters used by (Prud'homme and Koning, 2012).

4.2 Obtained results

Based on data from Tables 1 and 2, the numerical resolution of our problem provided the results shown in Table 3.

We recall that the decision variables (X_i), (Y_i) and (m_i) represent respectively the total number of vehicles of type *i* to lease, the number of months of use of each leased vehicle, the PM-period to be adopted for a vehicle of type *i*.

	Fuel vehicle (*i=1*)	**Electric vehicle (*i=2*)**
X_i	6	5
Y_i	52	57
m_i	14	15

Table 3: The obtained results

The obtained results show that it is recommended to lease 6 fuel vehicles and 5 electric vehicles. The fuel vehicles will be used for 52 months, each one of them is expected to travel a total distance of $(Y_1.v_1)$ (873 600 kms) and be submitted to PM every 14 months. The electric vehicles will be used 57 months, each one of them is expected to travel a total distance of $(Y_2.v_2)$ (957 600 kms) with a PM period of 15 months.

5 CONCLUSIONS AND PROSPECTS

In this paper, we considered optimizing the typology and size of a vehicle fleet to be leased for a given maximum period of time taking into account maintenance and environmental constraints. Two types of leased vehicles (fuel and electric) were considered. The decision variables are the number of vehicles to lease, the number of months of use of each vehicle and the periodicity of preventive maintenance actions to be performed on each vehicle. The derived solution must satisfy the fact that at least *K* kilometers must be travelled during a specified period (T_{max}) with an average usage rate (vi).

A mathematical cost minimization model has been developed. Furthermore, the problem is then solved using MATLAB language. A numerical experimentation has been performed and the obtained results have been analysed.

The average usage rate of every type of vehicles has been considered as constant and predefined. As an extension of this work, it is worth to consider it as an additional decision variable. In fact, the combination between the number of vehicles and the average usage rate for every type of vehicle impacts maintenance cost and environmental costs.

REFERENCES

Ba K, Dellagi S, Rezg N, and Erray W, 2016. Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory for an optimal production plan with consideration of CO2 emission. *Reliability Engineering & System Safety,* 149, 172-186. doi:10.1016/j.ress.2016.01.006.

Balcik, B., Kunz, N., Van Wassenhove, L. N., McConnell, R., & Hov, K., 2015. Centralized vehicle leasing in humanitarian fleet management: the UNHCR case. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management.

Ben Mechlia M, Schutz J, and Dellagi S, 2018. Integrated maintenance policy for transportation system according to a supply chain. *The Euro-Mediterranean Conferences on Mathematical Reliability (ECMR),* Djerba, Tunisia.

Benoist T, Estellon B, Gardi F, and Jeanjean A, 2010. Recherche locale pour un problème d'optimisation de tournées de véhicules avec gestion des stocks. *IN MOSIM*, Hammamet, Tunisia.

Gertsbakh I. Reliability theory: with applications to preventive maintenance. Springer; 2000 .

Gouiaa-mtibaa A, Dellagi S, Achour Z, and Erray W, 2018. Integrated Maintenance-Quality policy with rework process under improved imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering System Safety*, 173, 1-11. doi:10.1016/j.ress.2017.12.020.

ISO 14001, 2015 Environmental Management Systems: Requirements with Guidance for Use, International Organization for Standard https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:fr

Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change, 1998. http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf.

Miao, R., Li, Q., Huang, W., Guo, P., Mi, L., Zhang, Z., & Jiang, Z., 2020. Profit Optimization for Mileage-Based Pricing of Electric Vehicle Lease. *IEEE Transactions on Engineering Management*.

Mtalaa W, and Aggoune R, 2010. Un modèle bi-objectif pour la conception de chaînes logistiques vertes, *International Conference of Modeling and Simulation, optimization of the green supply chain*, pp. 216–224.

Prud'homme R, and Koning M, 2012. Electric vehicles: A tentative economic and environmental evaluation, Transport policy 23, 60-69 https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.06.001

Rezg N, Dellagi S, and Hajej Z, 2014. Maintenance Optimization for Transport Vehicles in a Supply Chain. *Logistics and transport N° 4 (24). 7-14.*

Sawadogo M, and Didier A, 2010. Modèle de plus court chemin multi objectif pour le transport intermodal au sein de la chaîne logistique verte. *8e Conférence Internationale de modélisation et Simulation-(MOSIM'10)*, Hammamet, Tunisie, pp. 392–401.

Troudi A, Dellagi S, and Addouche S-A, 2015. An optimal maintenance policy for transport vehicles in a supply chain under infrastructure / environment constraints. *CIE45 Proceedings, 28-30 October 2015*, Metz, France.

Turki, S. and Rezg, N. 2016. Study of a manufacturing system with transport activities in urban area. *(IFAC), International Federation of Automatic Control,* 49-3 (2016) 419-423.

FRAMEWORK OF PERFORMANCE MEASUREMENT AND MANAGEMENT FOR INDUSTRY 4.0 ERA

Liaqat Ali Shah[a], Fahd Amjad[b]
Pakistan Institute of Development Economics, PIDE
[a]shah.liaqat@hotmail.com, [b]fahd.amjad@gmail.com

François Vernadat
University of Lorraine, Metz, France
Vernadat30@gmail.com

ABSTRACT: *The evolution of manufacturing to "Industry 4.0" is well under way. It implies rethinking in measuring and managing performance in manufacturing and supply chain systems. Adaptation is required because the Industry 4.0 context is fundamentally different from the existing systems in terms of planning, operations and management. This paper, therefore, proposes a conceptual framework for developing performance measurement and management (PMM) for Industry 4.0. The proposed framework outlines the performance management process including performance measurement, performance visualization and decision-making using the data value chain concept. Each step of the value chain is mapped to the contemporary technologies available to facilitate the PMM development process. The paper concludes that performance management in Industry 4.0 will be substantially different in terms of data collection, analysis, evaluation and will have fair proportion of leading indicators alongside lagging indicators to describe performance; however, challenges to develop and operationalize the PMM remain and require seamless integration of both processes and technologies.*

KEYWORDS: *KPI, Performance Measurement and Management, Decision-making, Data analysis, Industry 4.0*

1 INTRODUCTION

Manufacturing and supply chain systems are constantly evolving to improve productivity and efficiency (Dalenogare et al., 2018). This evolution went through a series of stages generally divided into steam age, electrical age and information age and now gearing up towards the age of Industry 4.0, the fourth industrial revolution (Popkova et al., 2019, p. 23; Xu et al., 2018). These evolutions allowed the transition from a farming and feudal society to an industrial and capitalist society and then to post-industrial and services society, gradually releasing labor force from physical efforts towards more striking creativity (Pris'e'ca'ru, 2016). Of all the stages, Industry 4.0 brings promises of greater efficiency, shorter time-to-market, higher value products and new services (Jeschke et al., 2017). In industry 4.0, manufacturing operations systems and information and communication technologies (ICTs)—especially the internet of things (IoT) are seamlessly integrated, forming the so-called Cyber-Physical Systems (CPS) (Wang et al., 2015).

It is generally believed that the current evolution will have far reaching impact on future businesses and economy alike (Popkova et al., 2019). Predominant impacts are anticipated in manufacturing (Kusiak, 2019; Li et al., 2017), supply chains/value chains (Glas and Kleemann, 2016; Nagy et al., 2018; Strange and Zucchella, 2017) and service industries (Bodrow, 2017; Lee et al., 2014). Possible outcomes are enhanced efficiency, greater productivity, new business opportunities and profound impacts on the overall economic development (Li et al., 2017; Popkova et al., 2019). However, if not managed appropriately, the revolution will have negative impacts in terms of broadening social inequality (Kergroach, 2017) and cyber-risk (Ivanov et al., 2019).

However, strikingly yet discrete issue that stands out in the evolution towards Industry 4.0 is on how to measure and manage the performance of smart factories or cyber-physical systems (CPSs), and how to design and implement performance measurement and management system (PMM) to respond to the complex environment defined by Internet of Things (IoT), big data analytics and interoperability issues (Hwang et al., 2017; Okwir et al., 2018).

Performance measurement was a different story altogether in the previous industrial stages. Productivity was the dominant performance indicator in the first industrial phase, followed by quality and time in the electrical age and then comes flexibility, agility, reliability and reactivity in the information age (Shah, 2012; Vernadat et al., 2013). However, the latter objectives could not be achieved satisfactorily because of the rigidity of the manufacturing and supply chain systems in the information age (Weyer et al., 2015). Several factors contributed to the rigidity, for instance, cost of production switching and the cost of big data and lack of analytical tools to predict, diagnose and prescribe effectively and efficiently.

With Industry 4.0, many performance dimensions, inter alia, flexibility, agility and reactivity will be supported profoundly (Fatorachian and Kazemi, 2018; Moeuf et al., 2018; Müller et al., 2017) because the new paradigm allows horizontal and vertical integration, yet decentralizes information and decision making, thus enabling real-time communication between devices and the external environment, and relies on advanced analytics to fully understand the performance of the system. What it all means in

performance measurement and management terms is a completely new way of collecting, analyzing and evaluating performance-related data with new performance measures, especially performance indicators previously not possible to compute can now be computed in the new industrial paradigm. How it would be done and where the real value can be gained in terms of time, flexibility, reliability, cost and quality and beyond is the subject of the current study.

2 LITERATURE REVIEW

Performance measurement and management (PMM) of manufacturing and supply chain systems is a well-established field of study in the pre-industry 4.0 era (Bititci et al., 2018; Vernadat et al., 2013). However, real-time performance measurement is a challenge and can be the reason why Industry 4.0 is required (Horváth and Szabó, 2019). This will drastically change the ways the performance indicators are measured, analyzed and how then the decisions are made. It is argued that performance objectives will be extended to include more predictive performance objectives (Basu, 2013), opening up opportunities to design and measure leading performance indicators. What was not possible in the past is becoming reality with Industry 4.0 with its big data analytics functionality improving business performance (Bordeleau et al., 2020).

However, big data since characterized by high-velocity, high- volume and high-variety of information together with the challenge of ensuring data veracity will require tools and instruments to capture the essence of information and transform them in real-time to KPIs and beyond to performance measures for informed decision making in timely manner (Oztemel and Gursev, 2020). Business intelligence and analytics (BI&A) are being used to gain insights from data for informed decision making, yet again, BI are IT-enabled PMS with a focus on past situation (Bordeleau et al., 2020).

Industry 4.0 era PMM will be more complex and forward looking than its predecessors and will be steps ahead of what we do today by comparing what we achieved and what we wanted to achieve. However, work on the desired PMM is still in its infancy. Very few studies have attempted to develop PMM systems of the future.

For instance, Hwang et al. (2017) developed IoT-based performance measurement system using standards of ISA-95 and ISO 22400 and Enterprise Resource Planning (ERP), Manufacturing Execution System (MES) and IoT. In the study, the authors derive performance indicators related to OEE (overall equipment effectiveness) from the standards and relevant data from ERP, MES and IoT while modelling the scenario using BPM. The scenario is then simulated to see the actual and target performance on the shop floor.

Mörth et al. (2020) developed a framework for performance monitoring in the CPS environment for intralogistics and demonstrated the concept on a conveyor belt testbed. The framework derives 10 KPIs including throughput, cycle time, utilization, OEE etc. from ISO 22400. Data was gathered for the KPIs using webcam camera. The data is, afterwards, processed through Simulink to compute KPIs and visualized via cloud ThingSpeak platform. However, the study does not incorporate the feedback link to make corrective or preventive actions while limiting the focus solely to monitoring.

Also, Lee et al. (2018) developed IoT-based warehouse management system for Industry 4.0 using advanced data analytical approach. The IoT based WMS improved the overall efficiency of the warehouse with focus on order fulfillment, order accuracy and efficiency of order picking. The system uses fuzzy logic in real-time to select the most suitable order picking method.

The above-mentioned studies have attempted to measure performance in smart manufacturing and logistics settings while focusing on limited scope to demonstrate the concept. However, the real potential of Industry 4.0 technologies to advance performance measurement and management has not yet been fully demonstrated or is even lacking. A conceptual framework is therefore needed to guide the development of PMM systems for Industry 4.0 and is the subject of the current study.

3 FRAMEWORK FOR INDUSTRY 4.0 PERFORMANCE MEASUREMENT & MANAGEMENT

To measure and manage performance in the Industry 4.0 context, the paper proposes a framework based on the data value chain concept (Curry, 2016), modified to cover the broader aspects of performance measurement and management concept. The data value chain transforms raw data into actionable information, expressed in the form of performance indicators/performance measures. The idea is to get from data to decision employing the principles of performance measurement and management. This transformation happens linearly, passing through phases that form the data value chain as shown in Figure 1. Each phase of the value chain as well as required methods/tools are briefly explained as follows.



Figure 1: Data Value Chain

3.1.1 Data collection

Data for performance measurement can be collected using multiple means. In Industry 4.0, data are largely collected through sensors and networking devices. Manual data, and enterprise business systems such as ERP, CRM and many others (if deployed) can also contribute to the rich set of data in an Industry 4.0 ecosystem.

Real-time data collection is needed to keep track of the status of IoT components in a continuous manner (Cevikcan and Ustundag, 2018, p. 247). This is rather true for functional data (Glinz, 2007). However, in performance measurement, nonfunctional data are equally important to judge the performance of the process and the system. It can be obtained in the manufacturing setting by analyzing the processes (time & cost), process quality (yield, scrap and rework cost), machine/material handling/operation flexibility (set up time) or aftersales services (customer satisfaction). Process reliability (percentage on-time delivery) and order satisfaction (order fulfilment, etc.) are among the data required for performance evaluation in the supply chain setting (Bellgran and Säfsten, 2010). ISO 22400 can also be used as a template to prioritize data collection for conventional performance measures for shop floor performance measurement.

However, all the above-mentioned data are output measurements and hence required for computing lagging indicators of performance. In the Industry 4.0, predictive performance can be computed through leading indicators because data collection and big data analytics required for predictive performance are at the core of Industry 4.0. For that to happen, systems need to be made self-aware through big data analytics and integrated with market intelligence to predict future production scenarios. For instance, Purchasing Managers' Index (PMI) foresees the economic trends in the manufacturing and service sectors. The index gives an idea whether the economy expands, stays the same or contracts (Herwadkar and Ghosh, 2020). On the same pattern, an industry can gather data for developing their own indicators/indices to adjust to the future trends to minimize waste and make better use of their resources.

3.1.2 Data processing

Data processing is needed for two reasons. Firstly, to transform data into usable and desirable formats. Collected data can be either textual, numerical or multimedia. It is refined as per the defined logic and schema. Secondly, data processing is required prior to performance measurement as huge data acquisition through sensors or vision camera could not be passed on to the next stage, i.e. cloud otherwise large data transmission bandwidth would be needed which is not economical and convenient. In CPS, data are processed inside or close to the physical world (edge analytics) to reduce the network bandwidth requirement (Alasdair Gilchrist, 2016).

Gölzer et al. (2015) explore the data processing requirements of Industry 4.0 and identify six categories as requirements for the future factories including Data model (C10), Data integration (C20). Data Content (C30), Decision processing (C40), Knowledge processing (C50) and Real-time processing (60). With regard to performance measurement, subcategories of C50, that is Prepare data (C52) and Predict parameters (54) are relevant. The former prepares, filters and compiles data for decision making and the latter use the past data for predictive analysis (leading indicators). Other requirements can be used to further enrich data analytics for business intelligence.

3.1.3 Data Transformation

To add more value to the processed data and gain insights thereof, transformation is employed to compute performance measures and indicators. To this end, the data transformation stage has several functions to perform.

First is the definition of performance measures/indicators. ISO 22400 also defines key performance indicators for manufacturing operations management. A few performance measures along with their calculation methods are presented in Table 1.

Table 1: Performance Measures and Their Evaluation Methods

Performance Measure	Calculation Method
Product Cost	$C_{mfg.} = \sum_{i=1}^{N} C_{activity}^{i}$
Manufacturing Cycle Time (MCT)	Total time an entity (part, product) spends in the manufacturing system
Process Yield	(1-Scrap parts/Total parts)
Availability *	$= \frac{Actual\ production\ Time\ (APT)}{Planned\ Busy\ Time\ (PBT)}$

*"Availability" is a measure of how well a production unit is used relatively to the scheduled capacity. A 100% score means no delay in the operation (Hwang et al., 2017).

Performance measures are pre-determined and are updated and reviewed not so often. Once determined, they are made available for computation; however, there weights or relative importance in the overall performance computation change with scenarios.

The second function of the data transformation is the normalization of performance measures because they are heterogenous in nature and difficult to gain insight from. For instance, performance measures such as order fill rate,

manufacturing cycle time, on-time delivery, cost per order, productivity and the availability are measured in different units because they refer to different dimensions of a manufacturing system performance. The list can be more exhaustive if more system aspects are considered.

To extract meaningful insights from the data, they are mapped to the already defined performance measures and then transformed into commensurate values using multi-attribute value technique (MAVT). The MAVT is a structured methodology to handle trade-off among multiple objectives (and so performance measures/criteria) and assign a utility value to each measure by rescaling them onto a 0-1 scale with "0" representing the worst preference and "1" representing the best one. This transformation (mapping) of a physical measure onto a [0, 1] scale is also known as the value elicitation process and can be performed as follows (Berrah et al., 2008).

$$P: O \times M \rightarrow E$$
$$(o, m) \rightarrow P(o, m) = P$$

Where O, M *and* E represent universes of discourse, respectively of the set of objectives o, of the set of measures m and of the performance expressions P.

This transformation of performance measures used to happen through decision-aided tool such as MACBETH, AHP, etc. where the elicitation process to develop utility function is conducted by means of human interventions to judge the preferences and strengths of preferences through pairwise comparison of criteria. In Industry 4.0, the value elicitation can be performed using artificial intelligence or neural networks (NN) methods. Studies have been conducted to determine criteria weights through NN models, for instance, see (Golmohammadi, 2011).

3.1.4 Data Visualization

Visualization is a powerful tool to present elegantly multi-faceted measures and to facilitate the decision-making process. Visualization refers to both visual or graphical representation and the cognitive process of understanding an image. In performance management and decision contexts, visualization is about the representation of performance related data, information, concepts and knowledge in a graphical way to gain insights to ease the decision-making process. Moreover, the visualization process can be applied to improve understanding over large data sets without complex quantitative methods (Aki Jääskeläinen and Juho-Matias Roitto, 2016).

Visualization of performance depends on the type of data. Data can be one, two or multiple dimensional and require different techniques to approach the visualization problem. Commonly used techniques in visualizing performance currently in use are maps (e.g. strategy maps), network maps, graphs and charts, dashboards (Balanced Scorecard, Tableaux de bord) and many others. In addition, geometrically transformed displays, stacked displays, dense pixel displays, etc. could be other options to visualize data. In short, visualization of data is a rich field of study and provide users with myriad f options to choose from and present.

3.1.5 Data-driven Decision Making

Visualized data can be employed to make informed decisions. Decisions can be either to take preventive or corrective measures or any other. In the Industry 4.0 paradigm, decision can be made either using descriptive analytics, predictive analytics or prescriptive analytics.

The descriptive analytics have been widely used in business intelligence (BI) tools that rely on reports and past data to reach a decision. They tell what happens in the past. However, in the advanced analytics in the new paradigm, prediction and prescription are the core functionalities. Predictions are made to estimate the leading indicators using predictive analytics that would lead to trigger action or inaction. For this to happen, data for independent variables of an indicator (e.g. MCT in Table 1) are gathered, afterwards tuned and trained through supervised learning algorithm to predict output variable (dependent variable). The quality of the prediction depends on completeness of the independent variables leading to compute the output variable, the type of algorithm (linear/logistic regression, neural networks, K-nearest neighbor, decision tree etc.) and size of the dataset used. However, to aid the decision maker further to choose a course of action in the given scenario, prescriptive analytics will be used. In short, the level of use of both predictive and prescriptive analytics in the PM for decision making is where the real change in the PMM will be determined.

3.2 Process-Technology mapping

To facilitate the development of performance measurement and management system for Industry 4.0, a set of technologies have been identified to meet the need of each process step in the data chain. Moreover, the three-tier topology, i.e. edge tier, platform tier and enterprise tier proposed by (Alasdair Gilchrist, 2016) for developing industrial Internet of Things (I4.0) is sandwiched between process and technology as shown in Table 2. The edge tier is where all the data are collected, and pre-processing of data performed. The platform tier is where data storage and transformation are performed. The last tier is the enterprise tier where the user interacts with the system and visualized results are used to trigger an action or inaction.

4 CONCLUSION AND FUTURE WORK

The current study proposes a conceptual framework for PMM in Industry 4.0 using the data value chain concept and a recommended list of technologies currently available for each process step of the data value chain. Methods and tools for each process step are suggested to guide the development of the PMM system. Although still in inception, the framework is based on the experience and

previous work of the authors on PMM systems (Shah, 2012, Vernadat et al., 2013) and a review of the literature.

Especially, it is advocated that PMM for industry 4.0 will be substantially different from the current PMM systems. Indeed, drastic adaptations would be required to meet the future demand. Flexibility, agility and reactivity will

Table 2: Process and Technology Mapping for Performance Measurement and Management of Industry 4.0

Process step	**Process Functions**	**Architecture component**	**Technologies**
Data collection	Parameters of interest determination (what to measure? goal setting)	Edge tier	Sensors, camera, webcam etc.
Data processing	Prepare, filter, compile	Edge tier/Platform tier	Fog computing
Data transformation	Performance measures definition, normalization, aggregation	Platform tier	Descriptive analytics, Neural networks
Data visualization	Sorting data for different visuals, abstraction level determination	Enterprise tier	Dashboards, Radial graphs etc.
Data-driven Decision making	Actions plan (prevent, suggest corrective action, laissez-passer)	Enterprise tier	Prescriptive analytics

obviously be achieved through Industry 4.0 technologies; however, their evaluation methods need to be devised and developed to correctly assess performance objectives. Furthermore, operationalization of the performance measures using big data analytics and neural networks for informed decision making is a serious challenge ahead.

In the future, the authors plan to deepen the understanding of the requirements of performance measurement in the new paradigm and will investigate measures of interest, particularly the leading measures and their evaluation methods supported by the relevant technologies.

REFERENCES

Aki Jääskeläinen, Juho-Matias Roitto, 2016. Visualization techniques supporting performance measurement system development. Measuring Business Excellence 20, 13–25. https://doi.org/10.1108/MBE-09-2014-0032

Alasdair Gilchrist, 2016. Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. Apress.

Basu, A., 2013. Five pillars of prescriptive analytics success | Analytics Magazine [WWW Document]. URL https://pubsonline.informs.org/do/10.1287/LYTX.2013.02.07/full/ (accessed 5.31.20).

Bellgran, M., Säfsten, K., 2010. Production Development: Design and Operation of Production Systems, 1st ed. Springer-Verlag London.

Berrah, L., Mauris, G., Montmain, J., 2008. Monitoring the improvement of an overall industrial performance based on a Choquet integral aggregation. Omega 36, 340–351.

Bititci, U.S., Bourne, M., Cross, J.A. (Farris), Nudurupati, S.S., Sang, K., 2018. Editorial: Towards a Theoretical Foundation for Performance Measurement and Management. International Journal of Management Reviews 20, 653–660. https://doi.org/10.1111/ijmr.12185

Bodrow, W., 2017. Impact of Industry 4.0 in service oriented firm. Advances in Manufacturing 5, 394–400.

Bordeleau, F.-E., Mosconi, E., Santa-Eulalia, L.A. de, 2020. Business intelligence and analytics value creation in Industry 4.0: a multiple case study in manufacturing medium enterprises. Production Planning & Control 31, 173–185.

Cevikcan, E., Ustundag, A., 2018. Industry 4.0 : managing the digital transformation, Springer series in advanced manufacturing. Springer.

Curry, E., 2016. The Big Data Value Chain: Definitions, Concepts, and Theoretical Approaches, in: Cavanillas, J.M., Curry, E., Wahlster, W. (Eds.), New Horizons for a Data-Driven Economy. Springer International Publishing, Cham, pp. 29–37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21569-3_3

Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F., Frank, A.G., 2018. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. International Journal of Production Economics 204, 383–394. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019

Fatorachian, H., Kazemi, H., 2018. A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. Production Planning & Control 29, 633–644.

Glas, A.H., Kleemann, F.C., 2016. The impact of industry 4.0 on procurement and supply management: A conceptual and qualitative analysis. International Journal of Business and Management Invention 5, 55–66.

Glinz, M., 2007. On Non-Functional Requirements, in: Requirements Engineering Conference, 2007. RE '07. 15th IEEE International. IEEE, pp. 21–26. https://doi.org/10.1109/RE.2007.45

Golmohammadi, D., 2011. Neural network application for fuzzy multi-criteria decision making problems. International Journal of Production Economics

131, 490–504. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.01.015

Gölzer, P., Cato, P., Amberg, M., 2015. Data Processing Requirements of Industry 4.0 - Use Cases for Big Data Applications 15.

Herwadkar, S.S., Ghosh, S., 2020. Is PMI a good leading indicator of industrial production?: Evidence from India.

Horváth, D., Szabó, R.Zs., 2019. Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? Technological Forecasting and Social Change 146, 119–132. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021

Hwang, G., Lee, J., Park, J., Chang, T.-W., 2017. Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment. International Journal of Production Research 55, 2590–2602. https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1245883

Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., 2019. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. International Journal of Production Research 57, 829–846. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086

Jeschke, S., Brecher, C., Meisen, T., Özdemir, D., Eschert, T., 2017. Industrial internet of things and cyber manufacturing systems, in: Industrial Internet of Things. Springer, pp. 3–19.

Kergroach, S., 2017. Industry 4.0: New challenges and opportunities for the labour market. Форсайт 11.

Kusiak, A., 2019. Fundamentals of smart manufacturing: A multi-thread perspective. Annual Reviews in Control.

Lee, C.K.M., Lv, Y., Ng, K.K.H., Ho, W., Choy, K.L., 2018. Design and application of Internet of things-based warehouse management system for smart logistics. International Journal of Production Research 56, 2753–2768. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1394592

Lee, J., Kao, H.-A., Yang, S., 2014. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. Procedia Cirp 16, 3–8.

Li, G., Hou, Y., Wu, A., 2017. Fourth Industrial Revolution: technological drivers, impacts and coping methods. Chinese Geographical Science 27, 626–637.

Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., Barbaray, R., 2018. The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. International Journal of Production Research 56, 1118–1136.

Mörth, O., Emmanouilidis, C., Hafner, N., Schadler, M., 2020. Cyber-physical systems for performance monitoring in production intralogistics. Computers & Industrial Engineering 142, 106333. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106333

Müller, J., Dotzauer, V., Voigt, K.-I., 2017. Industry 4.0 and its impact on reshoring decisions of German manufacturing enterprises, in: Supply Management Research. Springer, pp. 165–179.

Nagy, J., Oláh, J., Erdei, E., Máté, D., Popp, J., 2018. The role and impact of industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain—The case of Hungary. Sustainability 10, 3491.

Okwir, S., Nudurupati, S.S., Ginieis, M., Angelis, J., 2018. Performance Measurement and Management Systems: A Perspective from Complexity Theory. International Journal of Management Reviews 20, 731–754. https://doi.org/10.1111/ijmr.12184

Oztemel, E., Gursev, S., 2020. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. Journal of Intelligent Manufacturing 31, 127–182.

Popkova, E.G., Ragulina, Y.V., Bogoviz, A.V. (Eds.), 2019. Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century, Studies in Systems, Decision and Control. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94310-7

Prisecaru, P., 2016. Challenges of the fourth industrial revolution. Knowledge Horizons. Economics 8, 57.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M., 2015. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting Group 9, 54–89.

Shah, L.-A., 2012. Méthode d'évaluation de performance de système industriel basée sur l'indicateur valeur-risque. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM.

Strange, R., Zucchella, A., 2017. Industry 4.0, global value chains and international business. Multinational Business Review.

Vernadat, F., Shah, L., Etienne, A., Siadat, A., 2013. VR-PMS: a new approach for performance measurement and management of industrial systems. International Journal of Production Research 51, 7420–7438. https://doi.org/10.1080/00207543.2012.752593

Wang, L., Törngren, M., Onori, M., 2015. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. Journal of Manufacturing Systems 37, 517–527.

Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., Gorecky, D., 2015. Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. IFAC-PapersOnLine, 15th IFAC Symposium onInformation Control Problems inManufacturing 48, 579–584. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.143

Xu, L.D., Xu, E.L., Li, L., 2018. Industry 4.0: state of the art and future trends. International Journal of Production Research 56, 2941–2962.

PERFORMANCE EVALUATION OF CENTRALIZED MAINTENANCE WORKSHOP IN THE CIRCULAR ECONOMY CONTEXT

Rony Arsène DJEUNANG MEZAFACK, Maria DI MASCOLO, Zineb SIMEU-ABAZI, Sina AKBARI HAGHIGHI

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G-SCOP, 38000 Grenoble, France
*Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

ABSTRACT: *The availability of production equipment is crucial to the life of manufacturers. When these high capital assets are heavy and require a significant set of resources, the company groups all the maintenance activities together in a centralized maintenance workshop (CMW). The circular economy, by integrating remanufacturing, is a way to support industrial development. Once integrated into the maintenance workshops model, the remanufacturing allows the recovery of irreparable components from failed equipment. Thus, the decision regarding the initial stock level and the remanufacturing rate has to be made. This paper proposes a new form of organization of the CMW allowing to take into account the different actions which contribute to sustainable development. Thus, depending on the condition of the defective equipment which can come from various production workshops, three options are available: repair, replacement with new equipment, or reconditioning/remanufacturing. A CMW model based on queuing networks is proposed as well as a simulation evaluation of performance indicators.*

KEYWORDS: *Centralized Maintenance Workshop, Circular economy, Remanufacturing, Industrial maintenance, Systems modelling, Performance management*

1 INTRODUCTION

The promotion of sustainable industries is one of the greatest challenges of the coming decades. For example, waste from industrial activities can be reduced by extending the life cycle of products, thereby increasing productivity and reducing environmental issues. Increasing productivity performance requires extending the operational availability of equipment. This is already being done through research and development of maintenance strategies. Maintenance strategies have automatically become crucial for critical systems, whose failures significantly affect equipment availability and staff safety. Over time, maintenance has progressively taken an important place as a core activity in companies depending on the availability of expensive assets to provide their services or to manufacture their products (Driessen et al., 2020).

Centralized maintenance workshops (CMW) aim to gather and to provide all the tools required for preventive and corrective maintenance processes (Simeu-Abazi et al., 2014). The recent models of CMW proposed in the literature focus on corrective maintenance of equipment, where malfunctioned parts or components are replaced by ready-for-use spares. Once the repair of the failed components is finished, they are forwarded back to stock "as-good-as-new."(Sleptchenko et al., 2019). However, one of the main assumptions of these models is that all equipment or components arriving at the CMW are repairable. Some extensions of the model proposed in the literature deal with the purchase of components to replace irreparable components that are discarded (Li et al., 2013). Remanufacturing is an approach that allows the recovery of parts from irreparable components and the production of other components as good as new (Potting et al., 2017).

This paper aims to extend the works presented in (Simeu-Abazi et al., 2014) and (Li et al., 2013) by proposing a model of CMW embedding the purchase of spare parts and the remanufacturing of components. So, one interesting research question is: how can we improve the CMW model by integrating remanufacturing? To answer this question, this article is structured into six sections, including the present introduction section. Section 2 is dedicated to the context and motivation of this work. Section 3 is dedicated to the description of the CMW. Section 4 describes the model of CMW and the way to evaluate its performance by simulation. Based on the developed method, we determine the optimal parameters of the proposed CMW embedding the management of irreparable components. The last section contains our conclusion and future developments.

2 CONTEXT AND MOTIVATION

In almost all the manufacturing companies, maintenance operations involve huge costs that can represent between 15% and 70% of the total production budget. It is the case of non-military equipment, which spent more than $9 billion from a turnover generated by the component repairs in 2015 (Sleptchenko et al., 2018). Besides, the last decades lead to the increasing changes in maintenance activities and associated budget (Simeu-Abazi et al., 2012). In the aircraft field, the high availability of fleet is crucial for airline operator profitability. Maintenance consists of replacing defective components by components in good condition rather than repair inside the aircraft. The failed component is then repaired separately allowing the reduction of TAT (repair turnaround times) by the operators (van Jaarsveld et al., 2015). In the high-speed railway locomotive field, we have the same approach with the presence of interchangeable component inventory where purchased or repaired components are waiting for assembly (Li et al., 2013). However, the recent model of Centralized Maintenance workshops did not take into account the irreparable components from failed pieces of equipment, which are assumed discarded. With the evolution of "Industry 4.0" one of the objectives of maintenance workshops is to be more sustainable and the Circular Economy is one of the recent and promising solutions for that. Remanufacturing technologies appear as the most appropriate strategies to deal with the recovery of irreparable components.

3 DESCRIPTION OF CENTRAL MAINTENANCE WORKSHOP

A CMW is designed first, to find the origin of the failure of the equipment in the production workshop, and second, to repair it (Simeu-Abazi et al., 2014). Depending on the nature of the failure, equipment is repaired on different stations, centralized or decentralized. In the case of Centralized Maintenance Workshops, all the process of repairing the equipment is inside the CMW.

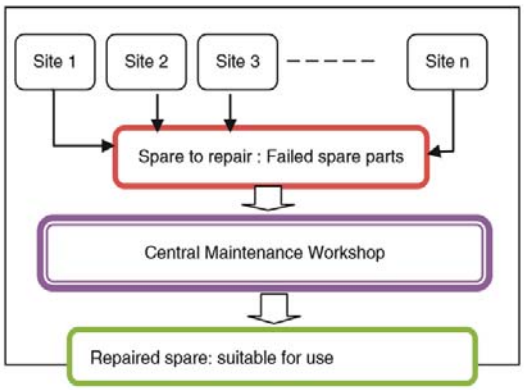


Figure 1: Organization of Maintenance

Coming from different production workshops as presented in Fig. 1, failed pieces of equipment arrive at the centralized maintenance workshop to be repaired and, after finishing the maintenance process, they are returned to the production line.

A maintenance process including the remanufacturing with Initial inventory is presented in Fig. 2. It consists of a set of stations for equipment diagnosis, disassembly, repair and assembly. The failed equipment reaching CMW is composed of two parts: the main one, that we will go on calling "equipment", and a component. We assume that only the component can fail, and that the main part of the equipment is always in good condition. Thus, after the diagnosis and the disassembly, we only have one component that is failed. The remaining part of the equipment is transferred directly to the assembly station, in a buffer, where it will wait for a component in good condition to be assembled with. If the failed component is respectively reparable, or irreparable, or discarded, then it is respectively transferred toward the repair station or the remanufacturing station or for the purchase of a new component.

If a defective component is not yet recovered but the remaining part of the equipment is already available at the assembly station, then a component from the initial inventory (and then a component from the other inventories: repaired, remanufactured or new components) replaces the defective component for the assembly of the equipment.

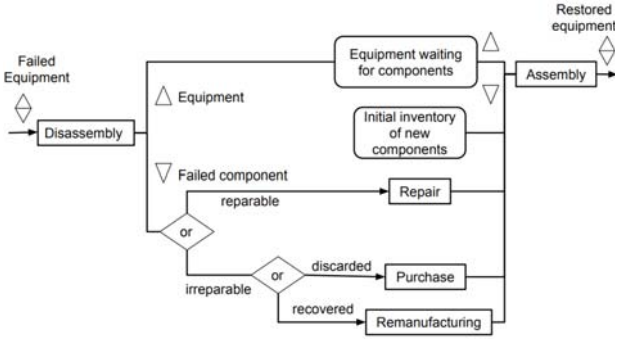


Figure 2: Organization of the CMW under study

The goal is to minimize the average TAT (turn-around times) defined as the spending time of a failed piece of equipment throughout the maintenance process, from disassembly to assembly. Thus, we have taken the methodology of the queuing network used in (Simeu-Abazi et al., 2014) to evaluate the CMW performance

4 MODELLING AND PERFORMANCE EVALUATION

A simulation, based on Queuing Network modelling, has been conducted to evaluate the CMW performance using

the software Matlab_Simulink. Extending the work of (Simeu-Abazi et al., 2014) and (Li et al., 2013), we reconduct the existing model assumptions and we add two others (8 and 9) related to the management of irreparable components. Thus, we consider that:

1) Each CMW station is composed of 6 parallel servers.
2) All the buffers have unlimited capacity. There is thus no blocking.
3) Pieces of equipment arrive at the CMW according to a homogeneous Poisson process with rate λ.
4) Disassembly lead times for all pieces of equipment follow an exponential distribution with rate μ_{ds}.
5) Assembly lead times for all pieces of equipment follow an exponential distribution with rate μ_{as}.
6) Repair lead times for all the components follow an exponential distribution with rate μ_{rp}.
7) We do not consider the transfer time from any stage to its downstream ones.
8) Remanufacturing lead times for all irreparable components follow an exponential distribution with rate μ_{rm}.
9) When an irreparable component is not remanufactured, a purchase order is sent for a new component.

4.1 Model description

The extension of the CMW existing model leads to the Queuing Network illustrated in Fig. 3. This new model is characterized by some important parameters:

- λ: equipment arrival rate (pieces of equipment/month)
- i: proportion of irreparable components ([0,1])
- r: proportion of remanufactured components ([0,1])
- B: Initial Inventory Level for the new components
- μ_{ds}: service rate of the disassembly station (pieces of equip/month)
- μ_{ti}: service rate of the reparability test station (pieces of equip/month)
- μ_{tr}: service rate of the remanufacturing test station (pieces of equip/month)
- μ_{rp}: service rate of the repair station (pieces of equip/month)
- μ_{rm}: service rate of the remanufacturing station (pieces of equip/month)
- μ_{nw}: service rate of the purchasing station (pieces of equip/month)
- μ_{as}: service rate of the disassembly station (pieces of equip/month)
- N_{rm}: total number of pieces of equipment with remanufactured components at the departure of the CMW
- N_{rp}: total number of pieces of equipment with repaired components at the departure of the CMW
- N_{nw}: total number of pieces of equipment with new components at the departure of the CMW
- S_{rm}: buffer of the remanufactured components
- S_{nw}: buffer of the new components
- S_{rp}: buffer of the repaired components
- For the simulation, the service rate of the test stations μ_{ti} et μ_{tr} are supposed to be very high compared to all the other service rates of CMW stations. Thus, the service time is considered negligible for these two stations.

Since we use simulation, we can consider other laws like weibull or normal distribution rather than exponential.

4.2 The decision variables of CMW

Remanufacturing aims to reduce the scraps from the maintenance process by recovering irreparable components. It can be realized by, either the OEM (Original Equipment Manufacturer), or by local remanufacturers (Kleber et al., 2011). In our model, we assume that CMW only has to decide on how many irreparable components must be provided to the remanufacturer for optimal costs and quality. Besides, we have to find the minimal Initial Inventory Level satisfying both the minimal TAT and the minimal costs. So we consider the following decision variables:

- r: remanufacturing rate
- B: Initial Component Inventory Level

4.3 Performance indicators for CMW

The maintenance process of each failed equipment reaching the CMW requires a set of resources (time, operators, tools and spare parts) until its departure. The main performance indicators of CMW are:

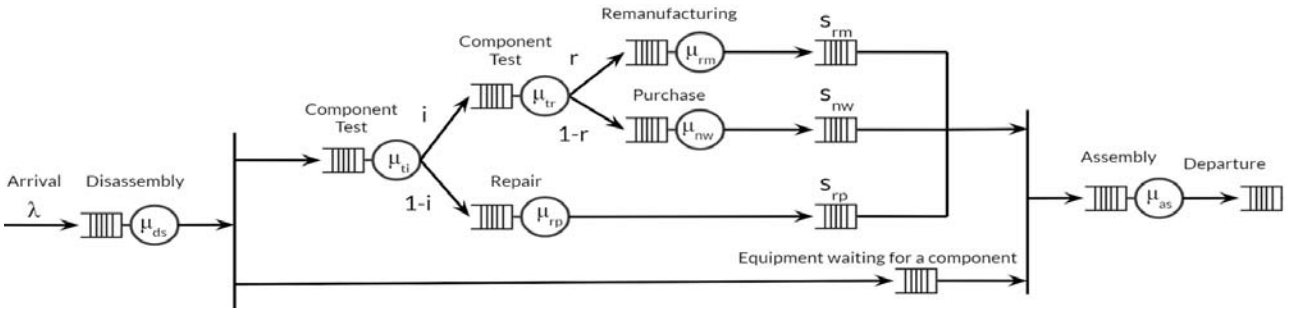


Figure 3: Queuing Network model of CMW

- $\overline{TAT}$: average time spent by the equipment throughout the maintenance process
- Total cost: evaluation of all the costs generated by the maintenance activities

4.4 Simulation experiments

Matlab_simulink is the software used to simulate the CMW model based on real benchmark data from high-speed railway locomotive fields, taken from (Li et al, 2012), and adapted to include the remanufacturing and the purchase of new parts. Using the simEvents library, many experiments have been carried out to get an overview of the influence of CMW parameters (B, r) and the service rates (μ_{rp}, μ_{rm}, μ_{nw}) on the performance indicators.

Real data: $\lambda = 6$, $\mu_{ds} = \mu_{as} = 6$, $\mu_{rp} = 2$, $\mu_{rp} > \mu_{rm} > \mu_{nw}$

The first series of experiments were performed by varying the rate of irreparable components, i, and the rate of components to be remanufactured, r, from 0 to 1. 15 configurations of CMW stations were obtained by simulating different values of service rates μ_{rp}, μ_{rm}, μ_{nw} combined to 5 configurations of Initial Inventory Level with B=10, 15, 20, 25, 30. Then we have:

Group 1: $\mu_{rm} = 1.9$, with $\mu_{nw} = 1.7, 1.3, 1, 0.5, 0.3$
Group 2: $\mu_{rm} = 1.7$, with $\mu_{nw} = 1.3, 1, 0.5, 0.3$
Group 3: $\mu_{rm} = 1.3$, with $\mu_{nw} = 1, 0.5, 0.3$
Group 4: $\mu_{rm} = 1$, with $\mu_{nw} = 0.5, 0.3$
Group 5: $\mu_{rm} = 0.5$, with $\mu_{nw} = 0.3$

A priority policy for selecting the components from S_{rm}, S_{nw} and S_{rp} inventories for the assembly was used so that new components have a higher priority than remanufactured components which have a higher priority than repaired components (New > Remanufactured > Repaired). We choose this policy to always prioritize the best quality components for assembly.

4.5 Costs evaluation

C_{inv} = Unit storage cost of components inside the CMW ($/component)
C_{TAT} = Unit cost generated by sojourn time of each failed piece of equipment inside the CMW ($/day/piece of equip)
C_{Stock}= Unit storage cost of each failed piece of equipment inside the CMW ($/piece of equip)
C_{nw} = Unit Cost to purchase a new component ($/component)
C_{rm} = Unit cost for remanufacturing ($/component)
C_{rp} = Unit cost for repairing ($/component)

A total cost is composed of the:

- Immobilization costs which are generated by the non-utilization of the components or the equipment (while being processed or in stock in the CMW)

$$Immobilizat_Cost = (\overline{TAT} \times C_{TAT} + C_{Stock}) \times (N_{rm} + N_{rp} + N_{nw})$$

- Operation costs which are generated by the maintenance process

$$Operation_Cost = C_{inv} \times B + N_{rm} \times C_{rm} + N_{nw} \times C_{nw} + N_{rp} \times C_{rp}$$

$$Total\ Cost = Imobilizat_Cost + Operation_Cost$$

From benchmark data, we have $C_{TAT} = 20$, $C_{inv} = 20$, $C_{Stock} = 20$ and $0 < C_{rp} < C_{rm} < C_{nw}$. Thus, proportionally to the value of C_{rp}, we obtained 6 different cost configurations:
Group 1: $C_{nw} = 3*C_{rp}$, with $C_{rm} = 2.5*C_{rp}$, $2*C_{rp}$, $1.5*C_{rp}$
Group 2: $C_{nw} = 2.5*C_{rp}$, with $C_{rm} = 2*C_{rp}$, $1.5*C_{rp}$
Group 3: $C_{nw} = 2*C_{rp}$, with $C_{rm} = 1.5*C_{rp}$

The investment cost of remanufacturing is considered to be zero, assuming that it is managed by the company that manufactures the new components (OEM). In this case, the OEM sells the remanufacturing services to the CMW at the unit cost C_{rm}.

5 SIMULATION RESULTS

Based on the instances presented in the previous section, the simulation leads to 1875 configurations of CMW with different parameters. To obtain the optimal combination (B,r) for each case we study the variation of the $\overline{TAT}$ and the Total Cost considering C_{rp}=1.

5.1 Average TAT

We studied the average waiting time of equipment in the system, considering different scenarios consisting of 5 groups of service rates for the operations (as it is explained in section 4.4) and different combinations of i, r and B. Table 1 shows the different values of i, r and B which are used in the study.

Service rate	i	r	B
Group n (n: 1, …, 5)	0, 0.2, …, 1	0, 0.2, …, 1	0, 10, 20, 30

Table 1: Combination of variables

For all initial inventory levels, the decrease of μ_{rm} and μ_{nw} led to an increase in the $\overline{TAT}$ value. Figure 4 indicates the variation of $\overline{TAT}$ for different values of parameter B and rate μ_{rm}, for $\mu_{nw} = 0.3$, i= 0.4 and r= 0.6.

As It is shown in figure 4, the increase of B from 0 to 20 has a positive effect on $\overline{TAT}$ and leads to a significant decrease in it. But changing B from 20 to 30

has no impact on $\overline{TAT}$. Studying all possible service rate values, it is obtained that the initial inventory level of 20 is the most time-efficient option in general.

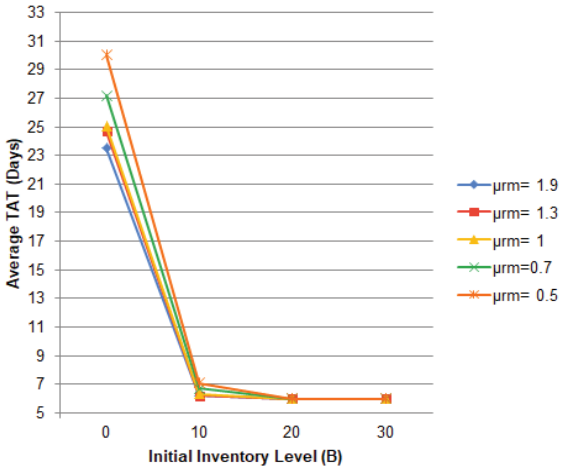


Figure 4: Relevance between average TAT and initial inventory level of components

5.2 Impact of total number of irreparable components on the total cost

In this section, we observe the total cost for each combination of (B,r) obtained by taking many values of parameter i, with fixed parameters μ_{rm} = 1.9, μ_{nw}= 1.3, C_{nw} = 3*C_{rp}, and C_{rm}= 2.5*C_{rp}.

We observe that the cost globally increases with the increase of i. The optimal Initial inventory is B=20 represented by the plots red and blue of the figure 5. The optimal remanufacturing rate satisfying the minimal costs are different depending on the value of i. For i=0.2 we obtain r=0.2, for i=0.4 we obtain r=1 and for i=0.6 we obtain r=0.8. If the Initial inventory level is equal to 0, B=0 in Figure 6, all the costs are the highest and decrease with the increase of the remanufacturing rate r and the decrease of the irreparable rate i.

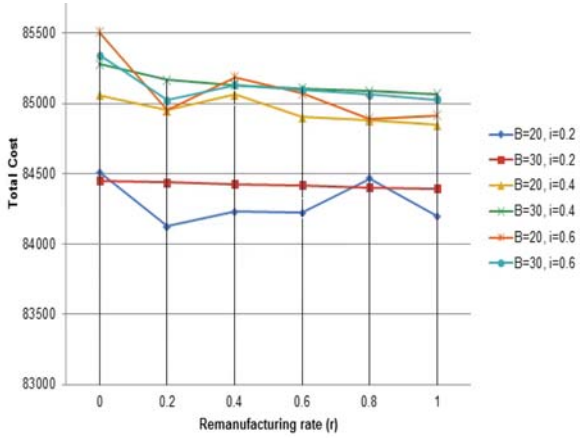


Figure 5: Total cost versus remanufacturing rate and Initial Inventory level for i=0.2 and i=0.4

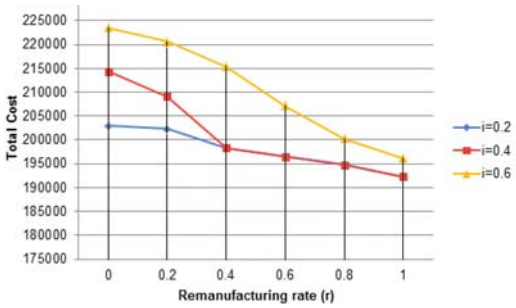


Figure 6: Total cost versus remanufacturing rate for B=0

5.3 Impact of the stations service rate

We take the following values: i = 0.2, C_{nw} = 3*C_{rp}, and C_{rm}= 2.5*C_{rp} and observe that the service rate of the stations μ_{rm} and μ_{nw} have effects on the optimal costs until r=0,4 as shown in figure 7. For example when μ_{rm} = 1.9, μ_{nw}= 1 the optimal (B, r)* is (10, 0.4). μ_{rm} = 1.9, μ_{nw}= 0.7 lead to a new (B, r)*= (20, 0.2); μ_{rm} = 1.3, μ_{nw}= 0.3 lead to (B, r)*= (20, 0.2) and μ_{rm} = 1.3, μ_{nw}= 0.3 lead to (B, r)*= (20, 0.4).

Globally from r=0.4 the service rate of the stations μ_{rm} and μ_{nw} no longer have much effects on the costs

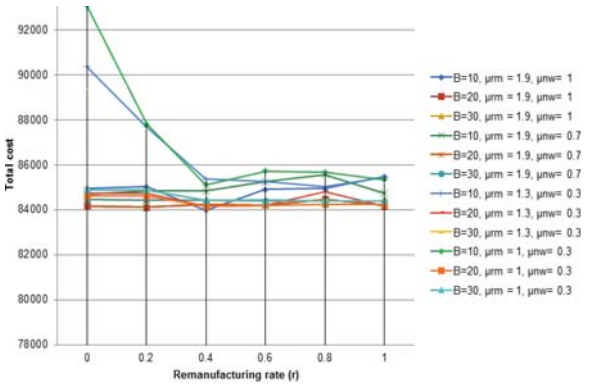


Figure 7: Total cost versus remanufacturing rate and Initial Inventory level with the variation of μ_{nw} and μ_{rm}

5.4 Unit costs

i = 0.2, μ_{rm} = 1.9, μ_{nw}= 1.3

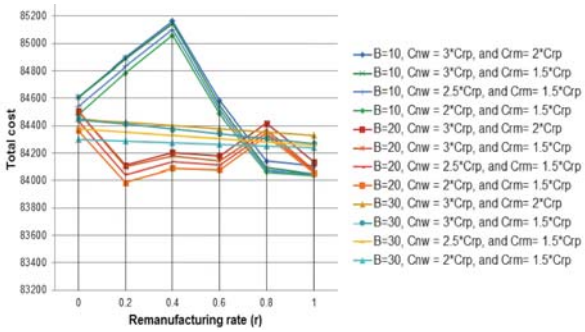


Figure 8: Total cost versus remanufacturing rate and Initial Inventory level with the variation of C_{nw} and C_{rm}

Globally as presented in figure 8, the variation of the unit costs C_{nw} and C_{rm} does not have effects on the shape of the plots whatever the values of B. Besides, regardless of the unit cost values, for respectively B=10, B=20 and B=30 we have respectively the optimal remanufacturing rate r=1, r=0.2 and r=1.
In general, for all the scenarios initial inventories B=0 and B=30 are never suitable for optimal costs. The choice is between B=10 and B=20. In the majority of cases, B=20 is the optimal inventory level.

6 CONCLUSION

In this study, we evaluated the costs and the average waiting time of failed equipment in a CMW integrating the remanufacturing of irreparable components. From the existing model, we proposed to explore the effects of variation of initial inventory level and remanufacturing rate of components. It suggests using remanufactured components may create value by affecting the total cost and average TAT, positively. The main results can be summarized as follows:

- Average TAT decreases significantly by increasing initial inventory level.
- Initial inventory level of 20 is the best option in terms of cost and time for the CMW with the defined number of servers and equipment arrival rate in this study. Regardless of the irreparable rate and the remanufacturing rate of the components the optimal value of B is the same.
- The optimal remanufacturing rate depends mainly on the irreparable rate of the components whatever the service rate of the stations or the unit costs.
- There is a trade off between average TAT and initial inventory level for some combination of C_{rm} and C_{nw}. Initial inventory level of 20 is the most time efficient option that will assure the high service level of CMW. But considering the total costs in some combinations of C_{rm} and C_{nw}, initial inventory level of 10 is the most cost efficient option compared to B equal to 20. It is noteworthy that the difference is too low. According to the policies of a company one of these options may be selected.

Future research based on this article can be to extend the CMW model embedding the variation of the equipment arrival rate. A closed-loop system can be studied considering the fact that each equipment reaches CMW several times throughout its life cycle. Another extension could be to study the quality of equipment at CMW departure throughout other priority policies selecting components from the three buffers.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported by the French government; through the Université Grenoble Alpes and the IDEX Grenoble (Cross Disciplinary Program Circular) with the reference number C7H-ID17-PR28-CIRCULARWP1.

REFERENCES

Driessen, M. A., G. J. van Houtum, W. H. M. Zijm, and W. D. Rustenburg, 2020. Capacity assignment in repair shops with high material uncertainty. *International Journal of Production Economics*, vol. 221, p. 107484.

Kleber, R., S. Zanoni, and L. Zavanella, 2011. On how buyback and remanufacturing strategies affect the profitability of spare parts supply chains. *International Journal of Production Economics*, 133(1), p. 135–142.

Li, B., X. Li, W. Guo, and S. Wu, 2013. A generalized stochastic Petri-net model for performance analysis and allocation optimization of a particular repair system. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 30(01), p. 1250042.

Potting, J., M. P. Hekkert, E. Worrell, and A. Hanemaaijer, 2017. Circular economy: measuring innovation in the product chain. *PBL Publishers*. No. 2544

Simeu-Abazi, Z., M. Di Mascolo, and E. Gascard, 2012. Performance evaluation of centralized maintenance workshop by using Queuing Networks. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(31), p. 175–180.

Simeu-Abazi, Z., M. Di Mascolo, and E. Gascard, 2014. Queuing network-based methodology for designing and assessing performance of centralized maintenance workshops. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 25(4), p. 510–527.

Sleptchenko, H. H., A. Turan, S. Pokharel, and T. Y. ElMekkawy, 2019. Cross-training policies for repair shops with spare part inventories. *International Journal of Production Economics*, vol. 209, p. 334–345.

Turan, H. H., A. Sleptchenko, S. Pokharel, and T. Y. ElMekkawy, 2018. A clustering-based repair shop design for repairable spare part supply systems. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 125, p. 232–244.

Van Jaarsveld, W., T. Dollevoet, and R. Dekker, 2015. Improving spare parts inventory control at a repair shop. *Omega*, vol. 57, p. 217–229.

COLLABORATION HORIZONTALE DURABLE DES RESEAUX DE TRANSPORT DE MARCHANDISES : ETAT DE L'ART ET PERSPECTIVES

A. ALOUI[1], R. DERROUICHE[2]

[2]Humanis, EM Ecole de management de Strasbourg
Université de Strasbourg
Strasbourg, France
aymen.aloui@u-picardie.fr, derrouiche@unistra.fr

N. HAMANI[1], L. DELAHOCHE[1]

[1]Laboratoire des Technologies Innovantes
Université de Picardie Jules Verne
Amiens, France
nadia.hamani, laurent.delahoche@u-picardie.fr,

RESUME : *La collaboration horizontale est devenue l'une des stratégies les plus émergentes et innovantes dans la conception et la gestion des chaînes logistiques. Cette approche est basée principalement sur le partage des ressources et des moyens entre deux ou plusieurs acteurs de même niveau qui coopèrent conjointement pour améliorer l'efficacité globale de leur organisation logistique. Ces dernières années, la concurrence, les problèmes de la mondialisation et les exigences de durabilité imposent des nouvelles approches et modèles de planification des réseaux de transport. Cette étude présente une analyse des approches existantes traitant de la collaboration horizontale et de la durabilité dans le transport de marchandises aux différents niveaux de planification. Cette recherche vise également à identifier les lacunes et les futures opportunités de recherche pour une meilleure planification logistique. Au total, 79 papiers publiés entre 2010 et 2020 ont été examinés. Les résultats montrent que l'intégration des trois dimensions de la durabilité dans la planification du transport est peu étudiée et, en particulier, la dimension sociale. De plus, l'analyse montre que la plupart des travaux se sont concentrés sur l'optimisation du transport au niveau opérationnel, avec peu de travaux sur le problème de conception et de pilotage de la supply chain intégrée.*

MOTS-CLES : *collaboration horizontale, durabilité, transport de marchandises, revue de la littérature*

1 INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, les entreprises ont été constamment à la recherche de nouvelles stratégies afin d'améliorer leurs performances logistiques et d'assurer leur compétitivité sur le marché national et/ou international. En effet, les clients sont devenus de plus en plus exigeants en termes de réactivité, de temps et de qualité de service. En plus de ces exigences, des préoccupations externes liées aux aspects du développement durable se sont imposées comme des contraintes principales dans le pilotage et l'évaluation de la performance de la supply chain, telles que les émissions de gaz à effet de serre, les coûts logistiques, le bruit et la congestion du trafic. Afin de répondre à la pression concurrentielle croissante induite par la mondialisation et de relever les défis du développement durable, les entreprises sont contraintes d'optimiser leur chaîne logistique, en particulier leur réseau de distribution, qui représente une composante majeure de toutes les chaînes logistiques (Muñoz-Villamizar et al., 2019a). Dans ce contexte, la collaboration est considérée comme l'un des mécanismes les plus efficaces pour les entreprises qui souhaitent accroître leur efficacité logistique (Mrabti et al., 2020). Cette approche peut être horizontale entre un groupe d'acteurs de différentes chaînes logistiques qui travaillent ensemble aux mêmes niveaux, verticale en considérant les relations hiérarchiques dans une chaîne logistique donnée, ou intégrée en combinant des synergies horizontales et verticales, ce que l'on appelle la coopération latérale (Soysal et al., 2018).

La collaboration horizontale suscite une attention croissante des chercheurs et des praticiens depuis quelques années et cela grâce aux multiples avantages, qu'elle génère par le partage des ressources (entrepôts, centres de distribution, etc.) et des moyens (camions et véhicules) entre des acteurs qui n'appartiennent pas à la même chaîne logistique (Pan et al., 2019). Cependant, comme évoqué précédemment, la performance de la supply chain ne peut pas être étudiée uniquement sur la base de sa performance économique mais doit intégrer de plus en plus l'ensemble des dimensions de développement durable. Les études et les pratiques industrielles sur ce sujet soulignent, de plus, que la collaboration horizontale est une approche efficace pour équilibrer les trois dimensions du développement durable (Pan et al., 2019). Néanmoins, la recherche scientifique sur la collaboration horizontale et l'intégration de la triple dimension de performance "*Triple-Bottom-Line*"(*3TBL*) est à un stade relativement peu avancé, il est donc nécessaire de réaliser une analyse approfondie sur l'état des connaissances. Quelques revues de littérature ont été identifiées dans le cadre de cette étude. En effet, Verdonck et al. (2013) et Guajardo et Rönnqvist (2016) ont examiné les méthodes de partage des gains générés par la collaboration horizontale dans le transport de marchandises. Au niveau opérationnel, Gansterer et Hartl (2018) ont passé en revue les modèles d'optimisation pour la planification collaborative des transports. Pan et al. (2019) ont fourni un examen détaillé des solutions de collaboration horizontale existantes et des problèmes de mise en œuvre dans le transport de marchandises. Cependant, il n'existe aucune étude qui analyse la collaboration horizontale et

la durabilité dans le secteur du transport de marchandises.

C'est dans ce contexte que notre objectif dans cette étude est de répondre aux deux questions suivantes : Premièrement, quels sont les travaux existants et les tendances actuelles de la recherche sur la collaboration horizontale et la durabilité dans le transport de marchandises ? Deuxièmement, quelles sont les lacunes existantes en matière de recherche et quelles sont les contributions potentielles aux travaux futurs ?

Le reste du document est organisé comme suit. La deuxième section décrit la méthodologie de l'étude. La troisième section présente et analyse en détail les travaux existants en fonction des critères de catégorisation. La quatrième section vise à identifier certaines orientations pour les recherches futures. Enfin, la sixième section conclut cette recherche.

2 METHODOLGIE DE RECHECHE

Pour répondre aux questions de recherche identifiées dans la section précédente, nous effectuons une analyse systématique de la littérature afin de fournir une analyse exhaustive et détaillée de l'état de l'art existant. Notre méthodologie de recherche comprend cinq étapes :

1. Formulation de la question de recherche et choix des mots clés,
2. Définition des critères d'inclusion et d'exclusion,
3. Recherche dans les bases de données et sélection des articles,
4. Discussion et analyse des résultats, et
5. Rapport des résultats.

2.1 Questions de recherche et choix de mots clés

La première étape d'une revue systématique consiste à définir clairement une ou plusieurs questions de recherche conduisant cette étude. En ce sens, le sujet principal de notre recherche est d'examiner l'état de l'art traitant la collaboration horizontale dans le transport de marchandises et d'étudier comment les aspects de durabilité sont inclus dans la prise de décision stratégique, tactique et opérationnelle. En outre, il est nécessaire de définir une liste des mots clés, en se basant sur le but de la recherche. Dans ce contexte, deux catégories de mots clés sont proposées. Les mots clés définis dans la première catégorie sont: « collaboration horizontale/*horizontal collaboration* », « coopération horizontale/*horizontal cooperation* », et «coalition/*coalition*». Dans la deuxième catégorie, nous avons identifié les mots suivants: « transport/*transportation* », « fret/*freight* », « logistique/*logistic* », « expéditeur / *shipper*», « transporteur/*carrier*», « distribution/*distribution* », « localisation/*location* », « routage/*routing*», « inventaire/*inventory* », « développement durable/*sustainable development* », « scial/*social* », « écologique/*ecological* », « économique/economic » et « environnemental/environmental ».

2.2 Critères d'inclusion/d'exclusion

En plus des mots clés définis précédemment lors de la première étape, une liste de critères d'inclusion et d'exclusion a été établie pour limiter la recherche documentaire et sélectionner les cibles. Nous avons utilisé deux critères d'inclusion : Se concentrer sur les études les plus récentes et les travaux publiés dans des revues à comité de lecture, des papiers de conférences et des chapitres d'ouvrage afin de fournir une analyse plus large et plus exhaustive. De plus, deux critères d'exclusion ont été utilisés dans cette recherche. Nous avons exclu les papiers qui se focalisent uniquement sur la collaboration verticale et ensuite les études qui sont dans une autre langue que l'anglais et le français.

2.3 Recherche et sélection des papiers

Pour collecter les données, nous avons effectué des recherches, en combinant les mots clés identifiés dans la sous-section 2.1, par exemple « collaboration horizontale » OU « coopération horizontale » ET « transport » OU « distribution », sur les bases de données les plus connues telles que : *Google Scholar*, *Web of Science*, *Scopus*, *Taylor & Francis*, *Springer*, *Science Direct* et *Wiley Online Library*. Cette première recherche a généré plus de 350 papiers.

Ensuite, afin de réduire la taille de la base de données et d'examiner un nombre raisonnable d'articles, nous avons mené un processus de filtrage en utilisant les critères d'inclusion et d'exclusion. Un ensemble de 79 papiers a été sélectionné pour la suite de cette analyse.

2.4 Cadre d'analyse des papiers sélectionnées

Sur la base des questions de recherche présentées dans la première section, nous avons défini un cadre d'analyse basé sur les deux axes ci-dessous :

Axe 1 : Niveau décisionnel et le problème traité :
- Niveau Stratégique :
  - Conception des réseaux (P1)
- Niveau Tactique
  - Partage des gains (P2),
  - Gestion des inventaires (P3),
  - Organisation de la distribution (P4)
- Niveau Opérationnel
  - Problème de routage (P5).

Axe 2 : Dimensions de durabilité
- Performance économique (D1)
- Performance environnementale (D2)
- Performance sociale (D3)

En se basant sur ce cadre, une analyse fine de papiers sectionnés est proposée dans les prochaines sections.

3 ANALYSE ET CATEGORISATION

3.1 Analyse décisionnelle

Cette section fournit une analyse complète des travaux existants sur la collaboration dans le domaine du transport de marchandises. Pour structurer l'analyse et améliorer la compréhension des résultats, nous classons la littérature selon le(s) problème(s) de planification traité(s).

3.1.1 Décisions stratégiques (P1)

Malgré le fait que les décisions stratégiques sont les plus cruciales dans la gestion des chaînes logistiques, ces décisions sont moins étudiées dans la littérature. Souvent, les décisions stratégiques dans le secteur du transport et de la logistique concernent la conception ou la co-conception d'un réseau de distribution afin de créer un avantage concurrentiel et d'atteindre les objectifs souhaités. Dans la littérature examinée, la plupart des études ont utilisé des stratégies de collaboration pour consolider les flux et réaliser des économies d'échelle. Par exemple, Ballot et Fontane (2010), Gonzalez-Feliu (2011), Gonzalez-Feliu et al.(2013), Pan et al. (2013) et Moutaoukil et al. (2013) ont utilisé le concept de la mutualisation logistique pour mieux organiser les flux logistiques et réduire les impacts écologiques du transport de marchandises. Par ailleurs, il existe d'autres recherches qui abordent le problème de la localisation des centres de distribution collaborative au niveau régional et urbain (par exemple, Verdonck et al., 2016 ; Tang et al., 2016 ; Hernández et al.,2012 ; Allaoui et al., 2019, Habibi et al., 2018). Bien que les travaux mentionnés ci-dessus traitent des niveaux de planification autre que la décision stratégique, les différentes décisions sont traitées séparément. En raison de l'intérêt de gérer les réseaux logistiques d'une manière intégrée, des études récentes traitant simultanément deux ou plusieurs décisions de planification ont été proposées dans la littérature. On peut citer, par exemple, les études de Quintero-Araujo et al. (2019), Nataraj et al. (2019) et Ouhader et El Kyal (2017; 2020) qui ont étudié le problème de conception d'un réseau de distribution collaboratif en utilisant un modèle de localisation et de routage (*Location Routing Problem LRP*). Le principal objectif est de concevoir un réseau logistique collaboratif et d'optimiser les futurs itinéraires en considérant simultanément les coûts logistiques, les émissions de gaz à effet de serre et les opportunités d'emploi créées (Ouhader et El Kyal, 2017). Hacardiaux et Tancrez (2019) ont évalué les avantages environnementaux de la collaboration horizontale dans un réseau de distribution à deux échelons en se basant sur le problème d'inventaire et de localisation (*Location Inventory Problem LIP*).

3.1.2 Décisions tactiques

Au niveau tactique, la planification des chaînes logistiques concerne généralement les décisions à moyen terme. C'est à ce niveau que les décisions seront prises par rapport à la taille de l'expédition, au partage des gains, à la définition des modes de transport ou de distribution, à la fréquence des visites des clients et à la gestion des stocks.

3.1.2.1 Répartition des gains (P2)

La littérature scientifique peut être classée en deux sous-catégories. Dans la première, on trouve les travaux qui visent à proposer uniquement des méthodes d'allocation des gains dans le but de réaliser des économies, tandis que la seconde regroupe les travaux qui traitent des autres niveaux de décision avec la prise en compte du partage des gains là où les méthodes d'allocation existantes sont utilisées.

Une grande partie de la littérature traite la première sous-catégorie en se concentrant sur la collaboration entre les chargeurs ou entre les transporteurs et sur la répartition des coûts. Des mécanismes de partage basés sur les théories du jeu coopératif ont été proposés dans (Yilmaz et Savasaneril, 2012; Cruijssen et al.,2010, Frisk et al., 2010; Audy et al., 2011, Lozano et al., 2013) afin de partager équitablement les économies réalisées grâce à la coopération. Parallèlement aux critères de coût dans l'attribution des gains, d'autres critères opérationnels tels que la flexibilité (Vanovermeire et Sörensen, 2014) et des critères stratégiques, par exemple, les émissions de CO_2 (Stellingwerf et al., 2019), ont été inclus dans les mécanismes de partage des coûts. En plus des économies de coûts, il y a aussi des économies environnementales qui sont généralement quantifiées en termes d'émissions de CO_2. Xu et al. (2012) et Wick et al. (2011) ont proposé des méthodes de répartition des économies environnementales obtenues par la mutualisation logistique en adaptant le concept de valeur de Shapley. Par ailleurs, plusieurs recherches ont adopté les méthodes existantes pour répartir les gains générés par la collaboration suite à la résolution d'un tel problème d'optimisation, ce sont les études de la deuxième sous-catégorie (par exemple, Ouhader et El Kyal, 2017, 2020 ; Sanchez et al. 2016; Wang et al. 2020, 2018b, 2018b, 2018c, 2018a, 2017b, 2017a).

Étant donné que les mécanismes de partage des gains sont importants pour assurer la stabilité d'une coalition, le problème du partage des gains peut être étendu au problème de la stabilité de la coalition. La plupart des travaux cités ci-dessus ne considèrent que la coalition impliquant tous les acteurs, en d'autres termes, la formation d'une grande coalition. Toutefois, les acteurs de la coalition peuvent à tout moment abandonner la coalition (Audy et al., 2012), et certains acteurs peuvent être plus intéressés à rejoindre des sous-coalitions qui ne sont pas forcément de grandes coalitions mais dont les bénéfices sont plus importants pour l'ensemble des membres de la coalition (Cruijssen et al., 2010). Par conséquent, la question qui se pose maintenant est de savoir comment trouver les sous-coalitions les plus stables et les plus rentables, quand elles existent. Ce problème correspond à ce que la littérature appelle la formation ou la configuration des coalitions. Cette dernière a reçu moins d'attention dans la littérature. Très peu d'études ont examiné la formation de coalitions dans

le transport collaboratif (Audy et al., 2012, Ben Jouida et al., 2017 ; Defryn et al., 2019).

3.1.2.2 Gestion des stocks (P3)

Les décisions concernant la gestion de l'inventaire ont été combinées avec d'autres décisions de planification pour les optimiser simultanément. Ces décisions ont été particulièrement incluses dans la modélisation logistique des produits périssables, c'est-à-dire des produits à durée de conservation fixe. Récemment, le problème de routage des stocks (*Inventory Routing Problem IRP*) a été étudié par Stellingwerf et al. (2018) dans le cas de la distribution alimentaire à température contrôlée. De même, Soysal et al. (2018) ont proposé un modèle pour traiter l'IRP vert avec incertitude dans le cas des produits périssables. En outre, Hacardiaux et Tancrez (2019) ont proposé un programme quadratique en nombres entiers mixtes pour optimiser conjointement les décisions relatives à la localisation et à l'inventaire.

3.1.2.3 Organisation de la distribution (P4)

L'organisation de la distribution des marchandises est l'une des questions clés de l'optimisation du transport. L'utilisation de routes conjointes et la consolidation des moyens sont considérées comme les principales sources d'économies (Ouhader and El Kyal, 2017, 2020 ; Pan et al., 2014, Moutaoukil et al., 2013). Les études de Quintero-Araujo et al. (2019), Nataraj et al. (2019), Gonzalez-Feliu (2011), Gonzalez-Feliu et al. (2013), Sanchez et al. (2016), Wang et al. (2016), Wang et al, (2017a, 2017b, 2018a, 2018b, 2018c, 2020) et Montoya-Torres et al. (2016) se sont intéressés à la distribution du dernier kilomètre pour développer et optimiser des réseaux de distribution communs. Le principal objectif de ces études est d'évaluer les avantages obtenus grâce à la collaboration et à la planification conjointe. Récemment, Muñoz-Villamizar et al. (2019a) ont considéré une flotte de véhicules électriques comme une nouvelle stratégie dans le routage collaboratif en milieu urbain.

3.1.3 Décisions opérationnelles (P5)

La plupart des études sur la collaboration horizontale dans le transport de marchandises se concentrent principalement sur la planification opérationnelle, soit environ 50 % des travaux examinés. Cette dernière consiste à établir de manière optimale ou efficace des plans de transport en partageant les moyens et les ressources dans le but d'améliorer l'efficacité opérationnelle des transporteurs ou des expéditeurs. En effet, les chercheurs se sont essentiellement focalisés sur les problèmes opérationnels liés aux routages des véhicules sous plusieurs variantes et sur la quantification des bénéfices de cette approche (par exemple, Adenso-Díaz et al., 2014a ; Fernández et al., 2018 ; Molenbruch et al., 2017 ; Montoya-Torres et al., 2016 ; Pérez-Bernabeu et al., 2015 ; Quintero-Araujo et al., 2016). La littérature indique que la planification conjointe de l'itinéraire des véhicules dans le transport de marchandises peut apporter des avantages économiques ainsi que des gains environnementaux (Chabot et al., 2018 ; Muñoz-Villamizar et al., 2020, 2019a, 2019b ; Wang et al., 2018c), ce qui améliore la rentabilité des entreprises grâce à l'inclusion de ressources externes (Wang et al., 2014).

Le *MDCARP* (*Multi-Depot Capacitated Arc Routing*) avec des camions complets dans le cadre d'une collaboration entre transporteurs a été étudié par Liu et al. (2010) pour minimiser les mouvements à vide. Dans un contexte similaire, Fernández et al. (2016) ont développé un modèle d'optimisation afin de résoudre le *NCARP* (*Non-Capacitive Arc Routing Problem*). Le *MDARP* (*Multi-Depot Arc Routing Problem*) a également été étudié par Weng et Xu (2014) pour fusionner les flux et optimiser le routage des tâches fusionnées. Les auteurs soulignent que la fusion des activités de transport permet de réaliser des économies d'échelle importantes. Hernández et Peeta (2011) ont traité le problème de la collaboration centralisée entre plusieurs transporteurs lorsque la capacité dépend du temps, c'est-à-dire que les transporteurs peuvent consommer ou fournir de la capacité pendant le routage. Moutaoukil et al. (2015) ont résolu le problème de routage des véhicules avec des fenêtres temporelles afin d'étudier l'impact de la livraison du dernier kilomètre sur les trois dimensions de la durabilité. Plus récemment, Wang et al. (2020) ont abordé la planification collaborative dans un réseau logistique multi-dépôts avec une allocation de fenêtres temporelles aux demandes de livraison.

Très souvent, les demandes d'expédition ne sont pas efficacement intégrées dans les itinéraires des transporteurs. Dans ce cas, une collaboration entre les transporteurs, qui consiste à attribuer ou échanger des demandes, est nécessaire afin d'améliorer l'efficacité globale du réseau de distribution et d'augmenter le bénéfice de chaque transporteur (par exemple, Ackermann et al. 2011; Nadarajah et Bookbinder 2013; Dai et Chen 2012; Liu et al. 2010). Les mécanismes d'enchères combinatoires sont extrêmement étudiés dans la résolution des problèmes d'échange de demandes et dans la planification centralisée (par exemple, Berger et Bierwirth, 2010 ; Özener et al., 2011 ; Kuyzu, 2017 ; Dahl et Derigs, 2011).

3.2 Analyse des dimensions de durabilité

Les papiers sélectionnés sont analysés ci-dessous par rapport aux trois dimensions de durabilité.

3.2.1 La performance économique (D1)

Dans une chaîne logistique, les objectifs principaux sont d'assurer la satisfaction des demandes des clients et la fonctionnalité des processus globaux de la chaîne logistique. La littérature traitant de la planification collaborative de transport se concentre principalement sur le plan économique, pour atteindre ces objectifs. Comme les modèles d'optimisation traditionnels, la plupart des con-

tributions cherchent à minimiser les coûts où à maximiser les bénéfices dans la planification du transport, que ce soit au niveau stratégique, tactique, opérationnel ou dans la combinaison de ces différentes décisions. Toutefois, la maximisation des bénéfices pour mesurer la performance économique dans les modèles décisionnels a reçu beaucoup moins d'attention. Cette constatation peut être par le fait que les industriels cherchent toujours à obtenir des avantages compétitifs en optimisant leurs réseaux logistiques. Dans la littérature examinée, la mesure la plus classique pour évaluer l'impact économique est le coût total du réseau, qui peut dépendre du niveau de décision traité. Par exemple, au niveau stratégique, le coût de l'ouverture ou du choix d'une installation est présent dans 9 études portant sur la conception des réseaux collaboratifs (Allaoui et al., 2019 ; Habibi et al., 2018 ; Hacardiaux and Tancrez, 2019 ; Hernández et al., 2012 ; Nataraj et al., 2019 ; Ouhader and El Kyal, 2017, 2020 ; Quintero-Araujo et al., 2019 ; Tang et al., 2016). Au niveau opérationnel et tactique, le coût dû au transport est la principale composante utilisée pour évaluer la performance économique. Cette dernière est évoquée dans quasiment toutes les études examinées (par exemple, Wang et al., 2018b ; Soysal et al., 2018, Özener et al., 2013, Montoya-Torres et al., 2016). En plus de ces deux composantes économiques, d'autres études prennent en compte les coûts d'inventaire (Allaoui et al., 2019; Hacardiaux et Tancrez, 2019; Özener et al., 2013; Pan et al., 2013; Soysal et al., 2018; Stellingwerf et al., 2019, 2018) et les coûts logistiques liés aux opérations de manutention et à l'utilisation des moyens de transport (Allaoui et al. 2019; Moutaoukil et al., 2013; Nataraj et al., 2019; Ouhader and El Kyal, 2017, 2020; Pan et al., 2014, 2013; Quintero-Araujo et al., 2019) dans la modélisation des critères économiques. Par ailleurs, Chabot et al., (2018) et Moutaoukil et al. (2015) ont tenté d'évaluer le niveau de service de la collaboration horizontale dans le transport de marchandises en tant qu'une autre mesure de la performance économique; mesure dite opérationnelle.

3.2.2 La performance environnementale (D2)

Les mesures d'impact environnemental se concentrent principalement sur la réduction des émissions de CO_2 du transport. Toutefois, le calcul des émissions de CO_2 liées au transport nécessite des méthodologies plus complexes et plus sophistiquées, qui ne peuvent être que des estimations en raison de la difficulté à quantifier divers aspects tels que les conditions météorologiques et les embouteillages. C'est pourquoi la plupart des recherches proposent et utilisent généralement des méthodes d'estimation simples basées sur la distance (par exemple, Gonzalez-Feliu, 2011 ; Leitner et al., 2011 ; Montoya-Torres et al, 2016 ; Makhloufi et al., 2015 ; Muñoz-Villamizar et al., 2020) et/ou sur la consommation d'énergie (par exemple, Chabot et al., 2018 ; Muñoz-Villamizar et al., 2019 ; Stellingwerf et al., 2019, 2018 ; Soysal et al., 2018, Wang et al., 2018c). Nataraj et al. (2019) et Quintero-Araujo et al. (2019) ont utilisé le modèle d'estimation proposé par Ubeda et al. (2011) pour estimer l'impact environnemental des différents scénarios de collaboration. Ce modèle est basé sur la distance et la charge transportée dans chaque véhicule. En outre, sur la base d'études antérieures, Ballot et Fontane (2010) et Pan et al. (2013, 2014) ont développé un modèle d'estimation des émissions de CO_2 qui prend en compte la charge transportée, la capacité utilisée, la vitesse moyenne de déplacement et la distance parcourue. Par ailleurs, pour améliorer le modèle d'estimation proposé dans (Ballot et Fontane, 2010 ; Pan et al., 2013, 2014), Moutaoukil et al. (2013) ont intégré la fabrication et l'amortissement des véhicules afin de mieux quantifier la dimension environnementale. De même, Ouhader et El Kyal (2017, 2020) ont utilisé le modèle proposé dans les travaux cités ci-dessus, mais avec la prise en compte des émissions de retours à vide des véhicules et des camions.

3.2.3 La performance sociale (D3)

Comme nous l'avons mentionnée ci-dessus, la dimension sociale a été moins étudiée que la durabilité économique et environnementale. Dans la littérature identifiée, l'emploi est le principal indicateur social retenu dans l'évaluation de la performance dans 2 sur 3 études (Ouhader et El Kyal, 2017 ; Allaoui et al., 2019). Ces dernières se concentrent principalement sur la quantification du nombre d'emplois. Très récemment, un outil d'aide à la décision a été proposé par Allaoui et al. (2019) pour évaluer les trois aspects de la durabilité selon l'indicateur choisi et la pondération correspondante pour chacun. Dans cet outil, l'aspect social est évalué en quantifiant à la fois le nombre total d'emplois, la satisfaction des employeurs et d'autres indicateurs liés à la sécurité et à la santé des employeurs, tels que le taux d'accidents. Dans (Moutaoukil et al., 2013), les chercheurs se sont intéressés particulièrement à la sécurité du transporteur et au confort des résidents. En raison de la difficulté à quantifier ces deux aspects, Moutaoukil et al. (2013) ont utilisé une estimation du risque d'accident et une quantification du nombre de véhicules utilisés pour pouvoir évaluer respectivement le risque d'accident et la congestion du réseau de transport.

3.3 Synthèse de l'analyse :

Le tableau ci-dessous propose une synthèse de l'ensemble des 79 travaux analysés selon les deux axes et pour chaque axe le type de problème ou la dimension traité(e):

Référence	Type de problème	Dimension de durabilité
Ackermann et al. (2011)	P5	D1
Adenso-Díaz et al. (2014a)	P5	D1
Adenso-Díaz et al. (2014b)	P5	D1
Allaoui et al. (2019)	P1-P3-P4-P5	D1-D2-D3
Ankersmit et al. (2014)	P5	D1
Audy et al. (2011)	P2	D1
Audy et al. (2012)	P2	D1
Bailey et al. (2011)	P5	D1
Ballot et Fontane (2010)	P1	D2
Ben Jouida et al. (2017)	P2	D1

Berger et Bierwirth (2010)	P5	D1
Buijs et al. (2016)	P5	D1
Buijs et Wortmann (2014)	P5	D1
Chabot et al. (2017)	P5	D1-D2
Chen (2016)	P5	D1
Cruijssen et al. (2010)	P2	D1
Cuervo et al. (2016)	P5	D1
Dahl et Derigs (2011)	P5	D1
Dai et Chen (2012)	P2	D1
Defryn et al. (2019)	P2-P5	D1
Fernández et al. (2016)	P5	D1
Fernández et al. (2018)	P5	D1
Fernández et Sgalambro (2020)	P1	D1
Frisk et al. (2010)	P2	D1
Gonzalez-Feliu (2011)	P1	D1-D2
Gonzalez-Feliu et al. (2013)	P1-P4	D1
Habibi et al. (2018)	P1-P2	D1
Hacardiaux et Tancrez (2019)	P1-P3	D1-D2
Hernández et al. (2011)	P5	D1
Hernández et al. (2012)	P1	D1
Hernández et Peeta (2011)	P5	D1
Hernández et Peeta (2014)	P5	D1
Kuyzu (2017)	P5	D1
Leitner et al. (2011)	P1	D1-D2
Li et al. (2016)	P2	D1
Liu et al. (2010a)	P5	D1
Liu et al. (2010b)	P5	D
Lozano et al. (2013)	P2	D1
Makhloufi et al. (2015)	P5	D1-D2
Molenbruch et al. (2017)	P5	D1
Montoya-Torres et al. (2016)	P4-P5	D1-D2
Moutaoukil et al. (2013)	P1-P4-P5	D1-D2-D3
Moutaoukil et al. (2015)	P5	D1-D2
Muñoz-Villamizar et al. (2019a)	P4-P5	D1-D2
Muñoz-Villamizar et al. (2019b)	P5	D1-D2
Muñoz-Villamizar et al. (2020)	P5	D1-D2
Nadarajah and Bookbinder (2013)	P5	D1
Nataraj et al. (2019)	P1-P4-P5	D1-D2
Ouhader and El Kyal (2017	P1-P4-P5	D1-D2-D3
Ouhader et kyal (2020)	P1-P4-P5	D1-D2
Özener et al. (2011)	P5	D1
Özener et al. (2013)	P2-P5	D1
Pan et al. (2013)	P1	D1-D2
Pan et al. (2014)	P1-P4-P5	D1-D2
Pérez-Bernabeu et al. (2015)	P5	D1-D2
Quintero-Araujo et al. (2016)	P5	D1
Quintero-Araujo et al. (2019)	P1-P4-P5	D1-D2
Sanchez et al. (2016)	P2-P4	D1-D2
Soysal et al. (2018)	P3-P5	D1-D2
Sprenger et Mönch (2014)	P5	D1
Stellingwerf et al (2018)	P3-P5	D1-D2
Stellingwerf et al. (2019)	P2-P5	D1-D2
Tang et al. (2016)	P1	D1
Vanovermeire et Sörensen (2014)	P2-P5	D1
Vaziri et al. (2019)	P5	D1
Verdonck et al. (2016)	P1-P2	D1
Wang et al. (2014)	P5	D1
Wang et al. (2017a)	P2-P5	D1
Wang et al. (2017b)	P2-P5	D1
Wang et al. (2018a)	P2-P5	D1
Wang et al. (2018b)	P2-P5	D1
Wang et al. (2018c)	P2-P5	D1-D2
Wang et al. (2020)	P2-P5	D1
Wang et Kopfer (2014)	P5	D1
Wang et Kopfer (2015)	P5	D1
Weng et Xu (2014)	P5	D1
Wick et al. (2011)	P2	D2
Xu et al. (2012)	P2	D1-D2
Yilmaz et Savasaneril (2012)	P2	D1

Tableau 1 : Classification en deux axes de l'état de l'art existant

En vue d'analyser les résultats et d'identifier les lacunes de la recherche, une répartition des travaux examinés en fonction des problèmes de décision et des trois dimensions de durabilité est présentée dans la figure 1 et la figure 2.

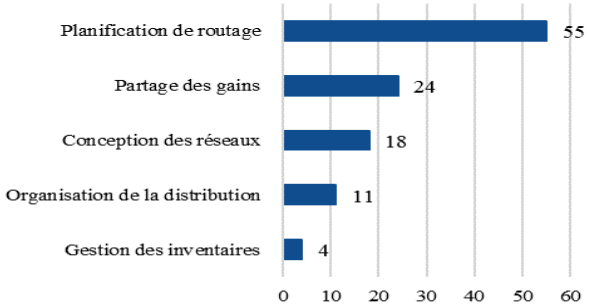


Figure 1: Nombre des papiers par problème de décision

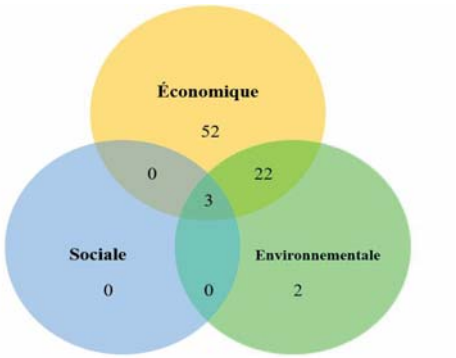


Figure 2: Nombre de papiers par dimension de durabilité

La première conclusion notable tirée du tableau 1 et de la figure 1 est que les différentes décisions de planification, du niveau stratégique jusqu'au niveau opérationnel, ont été étudié dans la littérature. Cette conclusion montre l'importance et le développement de la collaboration horizontale dans le domaine de transport. Le problème de routage est la question la plus abordé par les universitaires : 49% des papiers de cette revue se focalisent sur le routage de transport, tandis que 47% traitent de la planification stratégique, le partage de gains et l'organisation de la distribution et seulement 4% portent sur la gestion des inventaires.

La deuxième constatation concerne la mesure de performance. La figure 2 montre que la plupart des études se sont concentrées sur l'aspect économique et environnemental, voir la figure 2. L'aspect social est peu intégré. Sur les 79 papiers examinés, 52 ne traitent que la durabilité économique, 22 prennent en compte des objectifs économiques et environnementaux et seulement trois papiers intègrent les trois dimensions de durabilité. De plus, seules deux études passées en revue dans la présente analyse traitent la durabilité environnementale. Enfin, il n'y a aucun papier qui aborde les problèmes de transport collaboratif dans une seule perspective sociale et à l'intersection entre la dimension sociale et environnementale ou économique.

4 PERSPECTIVES DE RECHERCHE

À partir des résultats de l'analyse, nous suggérons quelques pistes de recherche futures afin de combler les lacunes existantes.

Une première ligne de recherche consiste à intégrer les différentes décisions liées aux niveaux stratégique, tactique et opérationnel dans un modèle exhaustif pour prendre en compte l'interdépendance entre ces niveaux. En effet, les décisions stratégiques ont un impact significatif sur la performance des organisations à long terme d'une part, et d'autre part sur les décisions et les contraintes tactiques et opérationnelles. De même, les décisions tactiques et opérationnelles peuvent avoir des conséquences sur l'efficacité des transports à long terme. Par exemple l'optimisation de la distribution de marchandises, les changements dans les fréquences de livraison et dans le mode de distribution dans le dernier kilomètre (véhicules électriques, drones, etc.) peuvent réduire les coûts logistiques et avoir d'autres conséquences environnementales et sociales. D'un autre côté, comme le monde est de plus en plus interconnecté, la gestion efficace du transport de marchandises est devenue plus évidente et plus importante au fil du temps, en particulier avec les récents progrès en matière d'apprentissage automatique. Les recherches futures devraient être axés sur l'intégration des nouveaux concepts dans les approches de planification intégrée du transport de marchandises. Par exemple, les algorithmes d'apprentissage automatique supervisée pourraient être combinés avec les méthodes de recherche opérationnelle pour prédire certaines informations imparfaites ou apprendre les modèles à générer des solutions efficaces en fonction des données disponibles.

Une deuxième perspective de recherche concerne les critères d'évaluation et les approches d'optimisation. Premièrement, en ce qui concerne la mesure des performances, le critère le plus fréquent dans les travaux examinés est la performance économique, à savoir la minimisation des coûts d'exploitation, y compris les coûts variables et fixes, les coûts de transport et de logistique. Les taxes sur les émissions peuvent être intégrées dans l'évaluation économique afin d'encourager les entreprises à utiliser des technologies plus propres dans une perspective écologique. En revanche, les deux autres aspects de la durabilité, et en particulier le volet social, est rarement pris en compte lors de l'évaluation des performances d'un réseau de distribution. Par conséquent, les recherches futures devraient être axées sur la manière dont cet aspect sera quantifié. Deuxièmement, il est important que les critères de performance soient équilibrés, c'est pourquoi des approches de modélisation devraient être développées pour une prise de décision efficace. Une opportunité de recherche consiste à combiner les méthodes d'optimisation classiques avec des approches qualitatives (multi-critères) afin de prendre en considération des critères formels.

Enfin, en raison de la nature dynamique des problèmes réels, les modèles de planification et les mécanismes de partage des gains devraient prendre en considération les risques des perturbations et des événements imprévues afin d'assurer la résilience et l'efficacité des organisations logistiques. Par exemple, la prise en compte des incertitudes (demande, trafic routière, etc.) et l'évaluation des risques de perturbations causés par des crises majeurs, par exemple l'épidémie de COVID-19), semblent deux perspectives de recherches importantes.

5 CONCLUSION

Dans ce papier, une revue systématique de la littérature est effectuée sur la collaboration et la durabilité en matière du transport de marchandises. L'objectif de cette étude est d'identifier et d'examiner l'état de l'art existant. Pour ce faire, nous avons classé et analysé la littérature selon le niveau de décision et la dimension de durabilité traitée. Ensuite, sur la base des résultats de l'analyse, nous avons identifié quelques perspectives de recherche qui méritent d'être étudiées dans les futurs travaux.

Les résultats de cette étude montrent que le problème de routage des véhicules est la principale décision traitée, dans près de 50 % de la littérature analysée. En outre, d'un point de vue mesure de performance, une plus grande attention a été accordée aux critères économiques et environnementaux au détriment des critères sociaux. Ces derniers sont pratiquement négligés dans la recherche. Il faudrait par conséquent améliorer les critères d'évaluation et de mesure des performances pour une meilleure prise de décision en matière de durabilité économique, environnementale et sociale. En outre, en raison de l'intérêt de gérer les chaînes logistiques d'une façon intégrée et de la nature dynamique des problèmes réels, différentes décisions de planification peuvent être combinées dans un modèle exhaustif avec prise en compte de l'incertitude afin d'améliorer l'efficacité globale des réseaux.

REFERENCES

Ackermann, H., Ewe, H., Kopfer, H., & Küfer, K. (2011). Combinatorial auctions in freight logistics. In J. Böse, H. Hu, C. Carlos, X. Shi, R. Stahlbock, & S. Voss (Eds.), Computational logistics. In Lecture Notes in Computer Science: 6971 (pp. 1–17). Berlin, Heidelberg: Springer.

Adenso-Díaz, B., Lozano, S., Garcia-Carbajal, S., Smith-Miles, K., 2014a. Assessing partnership savings in horizontal cooperation by planning linked deliveries. Transportation Research Part A: Policy and Practice 66, 268–279. https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.05.013

Adenso-Díaz, B., Lozano, S., Moreno, P., 2014b. Analysis of the synergies of merging multi-company transportation needs. Transportmetrica A: Transport Science 10, 533–547. https://doi.org/10.1080/23249935.2013.797518

Allaoui, H., Guo, Y., Sarkis, J., 2019. Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains.

Journal of Cleaner Production 229, 761–774. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.367

Ankersmit, S., Rezaei, J., Tavasszy, L., 2014. The potential of horizontal collaboration in airport ground freight services. Journal of Air Transport Management 40, 169–181. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.07.005

Audy, J.-F., D'Amours, S., Rönnqvist, M., 2012. An empirical study on coalition formation and cost/savings allocation. International Journal of Production Economics 136, 13–27. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.08.027

Audy, J.-F., D'Amours, S., Rousseau, L.-M., 2011. Cost allocation in the establishment of a collaborative transportation agreement—an application in the furniture industry. Journal of the Operational Research Society 62, 960–970. https://doi.org/10.1057/jors.2010.53

Bailey, E., Unnikrishnan, A., Lin, D.-Y., 2011. Models for Minimizing Backhaul Costs through Freight Collaboration. Transportation Research Record 2224, 51–60. https://doi.org/10.3141/2224-07

Ballot, E., Fontane, F., 2010. Reducing transportation CO 2 emissions through pooling of supply networks: perspectives from a case study in French retail chains. Production Planning & Control 21, 640–650. https://doi.org/10.1080/09537287.2010.489276

Ben Jouida, S., Krichen, S., Klibi, W., 2017. Coalition-formation problem for sourcing contract design in supply networks. European Journal of Operational Research 257, 539–558. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.040

Berger, S., Bierwirth, C., 2010. Solutions to the request reassignment problem in collaborative carrier networks. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 46, 627–638. https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.12.006

Björnfot, A., Torjussen, L., 2012. Extent and Effect of Horizontal Supply Chain Collaboration among Construction SME. Journal of Engineering 9.

Buijs, P., Alvarez, J.A.L., Veenstra, M., Roodbergen, K.J., 2016. Improved Collaborative Transport Planning at Dutch Logistics Service Provider Fritom. Interfaces 46, 119–132. https://doi.org/10.1287/inte.2015.0838

Buijs, P., ("Hans") Wortmann, J.C., 2014. Joint operational decision-making in collaborative transportation networks: the role of IT. Supp Chain Mnagmnt 19, 200–210. https://doi.org/10.1108/SCM-08-2013-0298

Chabot, T., Bouchard, F., Legault-Michaud, A., Renaud, J., Coelho, L.C., 2018. Service level, cost and environmental optimization of collaborative transportation. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 110, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.11.008

Chen, H., 2016. Combinatorial clock-proxy exchange for carrier collaboration in less than truck load transportation. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 91, 152–172. https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.04.008

Cruijssen, F., Borm, P., Fleuren, H., Hamers, H., 2010. Supplier-initiated outsourcing: A methodology to exploit synergy in transportation. European Journal of Operational Research 207, 763–774. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.06.009

Dahl, S., Derigs, U., 2011. Cooperative planning in express carrier networks — An empirical study on the effectiveness of a real-time Decision Support System. Decision Support Systems 51, 620–626. https://doi.org/10.1016/j.dss.2011.02.018

Dai, B., Chen, H., 2012. Profit allocation mechanisms for carrier collaboration in pickup and delivery service. Computers & Industrial Engineering 62, 633–643. https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.11.029

Defryn, C., Sörensen, K., Dullaert, W., 2019. Integrating partner objectives in horizontal logistics optimisation models. Omega 82, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.11.008

Fernández, E., Fontana, D., Speranza, M.G., 2016. On the Collaboration Uncapacitated Arc Routing Problem. Computers & Operations Research 67, 120–131. https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.10.001

Fernández, E., Roca-Riu, M., Speranza, M.G., 2018. The Shared Customer Collaboration Vehicle Routing Problem. European Journal of Operational Research 265, 1078–1093. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.051

Fernández, E., Sgalambro, A., 2020. On carriers collaboration in hub location problems. European Journal of Operational Research 283, 476–490. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.038

Frisk, M., Göthe-Lundgren, M., Jörnsten, K., Rönnqvist, M., 2010. Cost allocation in collaborative forest transportation. European Journal of Operational Research 205, 448–458. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.01.015

Gansterer, M., Hartl, R.F., 2018. Collaborative vehicle routing: A survey. European Journal of Operational Research 268, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.023

Gonzalez-Feliu, J., Malhéné, N., 2014. Logistics Pooling for City Supply. Supply Chain Forum: An International Journal 15, 2–4. https://doi.org/10.1080/16258312.2014.11517362

Gonzalez-Feliu, J., Morana, J., Grau, J.-M.S., Ma, T.-Y., n.d. Design and scenario assessment for collaborative logistics and freight transport systems 33.

Guajardo, M., Rönnqvist, M., 2016. A review on cost allocation methods in collaborative transportation: M. Guajardo and M. Rönnqvist. Intl. Trans. in Op. Res. 23, 371–392. https://doi.org/10.1111/itor.12205

Guajardo, M., 2018. Environmental benefits of collaboration and allocation of emissions in road freight transportation. In: Zeimpekis, V., Aktas, E., Bourlakis, M., Minis, I. (Eds.), Sustainable Freight Transport, vol. 63. Springer, Cham, ISBN 978-3-319-62917-9.

Guajardo, M., Rönnqvist, M., Flisberg, P., Frisk, M., 2018. Collaborative transportation with overlapping coalitions. European Journal of Operational Research 271, 238–249. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.001

Habibi, M.K.K., Allaoui, H., Goncalves, G., 2018. Collaborative hub location problem under cost uncertainty. Computers & Industrial Engineering 124, 393–410. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.028

Hacardiaux, T., Tancrez, J.-S., 2019. Assessing the environmental benefits of horizontal cooperation using a location-inventory model. Cent Eur J Oper Res. https://doi.org/10.1007/s10100-018-0599-7

Hernández, S., Peeta, S., 2014. A carrier collaboration problem for less-than-truckload carriers: characteristics and carrier collaboration model. Transportmetrica A: Transport Science 10, 327–349. https://doi.org/10.1080/23249935.2013.766279

Hernández, S., Peeta, S., 2011. Centralized Time-Dependent Multiple-Carrier Collaboration Problem for Less-Than-Truckload Carriers. Transportation Research Record 2263, 26–34. https://doi.org/10.3141/2263-04

Hernández, S., Peeta, S., Kalafatas, G., 2011. A less-than-truckload carrier collaboration planning problem under dynamic capacities. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 47, 933–946. https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.03.001

Hernández, S., Unnikrishnan, A., Awale, S.S., 2012. Centralized Carrier Collaboration Multihub Location Problem for Less-Than-Truckload Industry: Hybrid Hub-and-Spoke Network. Transportation Research Record 2269, 20–28. https://doi.org/10.3141/2269-03

Jesus Gonzalez-Feliu, Joëlle Morana, Josep-Maria Salanova Grau, Tai-Yu Ma. Design and scenario assessment for collaborative logistics and freight transport systems. International Journal of Transport Economics, 2013, pp.207-240. Ffhalshs-00844705ff

Jesus Gonzalez-Feliu. Costs and benefits of logistics pooling for urban freight distribution: scenario simulation and assessment for strategic decision support. Seminario CREI, Nov 2011, Rome, Italy.

Kuyzu, G., 2017. Lane covering with partner bounds in collaborative truckload transportation procurement. Computers & Operations Research 77, 32–43. https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.07.018

Leitner, R., Meizer, F., Prochazka, M., Sihn, W., 2011. Structural concepts for horizontal cooperation to increase efficiency in logistics. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 4, 332–337. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.01.009

Li, J., Cai, X., Zeng, Y., 2016. Cost allocation for less-than-truckload collaboration among perishable product retailers. OR Spectrum 38, 81–117. https://doi.org/10.1007/s00291-015-0424-9

Liu, R., Jiang, Z., Fung, R.Y.K., Chen, F., Liu, X., 2010a. Two-phase heuristic algorithms for full truckloads multi-depot capacitated vehicle routing problem in carrier collaboration. Computers & Operations Research 37, 950–959. https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.08.002

Liu, R., Jiang, Z., Liu, X., Chen, F., 2010b. Task selection and routing problems in collaborative truckload transportation. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 46, 1071–1085. https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.05.003

Lozano, S., Moreno, P., Adenso-Díaz, B., Algaba, E., 2013. Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. European Journal of Operational Research 229, 444–452. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.034

Makhloufi, R., Cattaruzza, D., Meunier, F., Absi, N., Feillet, D., 2015. Simulation of Mutualized Urban Logistics Systems with Real-time Management. Transportation Research Procedia 6, 365–376. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.03.027

Molenbruch, Y., Braekers, K., Caris, A., 2017. Benefits of horizontal cooperation in dial-a-ride services. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 107, 97–119. https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.09.001

Montoya-Torres, J.R., Muñoz-Villamizar, A., Vega-Mejía, C.A., 2016. On the impact of collaborative strategies for goods delivery in city logistics. Production Planning & Control 27, 443–455. https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1147092

Morana, J., Gonzalez-Feliu, J., Semet, F., 2014. Urban Consolidation and Logistics Pooling: Planning, Management and Scenario Assessment Issues, in: Gonzalez-Feliu, J., Semet, F., Routhier, J.-L. (Eds.), Sustainable Urban Logistics: Concepts, Methods and Information Systems. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 187–210. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31788-0_10

Moutaoukil, A., Neubert, G., Derrouiche, R., 2015. Urban Freight Distribution: The impact of delivery time on sustainability. IFAC-PapersOnLine 48, 2368–2373. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.442

Moutaoukil, A., Derrouiche, R., Neubert, G., & Saint-Etienne, E. S. C. (2013). Modeling a pooling logistics strategy for agri-food SMEs Acknowledgments. In 14th IFIP WG 5.5 Work. Conf. Virtual Enterp. PRO-VE 2013 (pp. 2-3).

Muñoz-Villamizar, A., Quintero-Araújo, C.L., Montoya-Torres, J.R., Faulin, J., 2019a. Short- and mid-term evaluation of the use of electric vehicles in urban freight transport collaborative networks : a case study. International Journal of Logistics Research and Applications 22, 229–252. https://doi.org/10.1080/13675567.2018.1513467

Muñoz-Villamizar, A., Quintero-Araújo, C.L., Montoya-Torres, J.R., Faulin, J., 2019b. Short- and mid-term evaluation of the use of electric vehicles in urban freight transport collaborative networks : a case study. International Journal of Logistics Research and Applications 22, 229–252. https://doi.org/10.1080/13675567.2018.1513467

Muñoz-Villamizar, A., Santos, J., Montoya-Torres, J.R., Velázquez-Martínez, J.C., 2020. Measuring environmental performance of urban freight transport systems: A case study. Sustainable Cities and Society 52, 101844. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101844

Muñoz-Villamizar A., Solano-Charris E.L., Santos J., Montoya-Torres J.R.2019b. Measuring Environmental Impact of Collaborative Urban Transport Networks: A Case Study. In: Paternina-Arboleda C., Voß S. (eds) Computational Logistics. ICCL 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11756

Mrabti, N., Hamani, N., Delahoche, L., 2020. The pooling of sustainable freight transport. Journal of the Operational Research Society 1–16. https://doi.org/10.1080/01605682.2020.1772022

Nadarajah, S., Bookbinder, J.H., 2013. Less-Than-Truckload carrier collaboration problem: modeling framework and solution approach. J Heuristics 19, 917–942. https://doi.org/10.1007/s10732-013-9229-7

Nataraj, S., Ferone, D., Quintero-Araujo, C., Juan, A.A., Festa, P., 2019. Consolidation centers in city logistics: A cooperative approach based on the location routing problem. 10.5267/j.ijiec 393–404. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2019.1.001

Ouhader, H., El Kyal, M., 2017. Combining Facility Location and Routing Decisions in Sustainable Urban Freight Distribution under Horizontal Collaboration: How Can Shippers Be Benefited? Mathematical Problems in Engineering 2017, 1–18. https://doi.org/10.1155/2017/8687515

Ouhader, H., kyal, M.E., 2020. Assessing the economic and environmental benefits of horizontal cooperation in delivery: Performance and scenario analysis. 10.5267/j.uscm 303–320. https://doi.org/10.5267/j.uscm.2019.12.001

Özener, O.Ö., Ergun, Ö., Savelsbergh, M., 2013. Allocating Cost of Service to Customers in Inventory Routing. Operations Research 61, 112–125. https://doi.org/10.1287/opre.1120.1130

Özener, O.Ö., Ergun, Ö., Savelsbergh, M., 2011. Lane-Exchange Mechanisms for Truckload Carrier Collaboration. Transportation Science 45, 1–17. https://doi.org/10.1287/trsc.1100.0327

Palhazi Cuervo, D., Vanovermeire, C., Sörensen, K., 2016. Determining collaborative profits in coalitions formed by two partners with varying characteristics. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 70, 171–184. https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.12.011

Pan, S., Ballot, E., Fontane, F., 2013. The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. International Journal of Production Economics 143, 86–94. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.023

Pan, S., Ballot, E., Fontane, F., Hakimi, D., 2014. Environmental and economic issues arising from the pooling of SMEs' supply chains: case study of the food industry in western France. Flex Serv Manuf J 26, 92–118. https://doi.org/10.1007/s10696-012-9162-3

Pan, S., Trentesaux, D., Ballot, E., Huang, G.Q., 2019. Horizontal collaborative transport: survey of solutions and practical implementation issues. International Journal of Production Research 57, 5340–5361. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1574040

Pérez-Bernabeu, E., Juan, A.A., Faulin, J., Barrios, B.B., 2015. Horizontal cooperation in road transportation: a case illustrating savings in distances and greenhouse gas emissions. Intl. Trans. in Op. Res. 22, 585–606. https://doi.org/10.1111/itor.12130

Quintero-Araujo, C.L., Gruler, A., Juan, A.A., 2016. Quantifying Potential Benefits of Horizontal Cooperation in Urban Transportation Under Uncertainty: A Simheuristic Approach, in: Luaces, O., Gámez, J.A., Barrenechea, E., Troncoso, A., Galar, M., Quintián, H., Corchado, E. (Eds.), Advances in Artificial Intelligence. Springer International Publishing, Cham, pp. 280–289. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44636-3_26

Quintero-Araujo, C.L., Gruler, A., Juan, A.A., Faulin, J., 2019. Using horizontal cooperation concepts in integrated routing and facility-location decisions. Intl. Trans. in Op. Res. 26, 551–576. https://doi.org/10.1111/itor.12479

Sanchez, M., Pradenas, L., Deschamps, J.-C., Parada, V., 2016. Reducing the carbon footprint in a vehicle routing problem by pooling resources from different companies. Netnomics 17, 29–45. https://doi.org/10.1007/s11066-015-9099-2

Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Haijema, R., van der Vorst, J.G.A.J., 2018. Modeling a green inventory routing problem for perishable products with horizontal collaboration. Computers & Operations Research 89, 168–182. https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.02.003

Sprenger, R., Mönch, L., 2014. A decision support system for cooperative transportation planning: Design, implementation, and performance assessment. Expert Systems with Applications 41, 5125–5138. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.02.032

Stellingwerf, H.M., Kanellopoulos, A., Cruijssen, F.C.A.M., Bloemhof, J.M., 2019. Fair gain allocation in eco-efficient vendor-managed inventory cooperation. Journal of Cleaner Production 231, 746–755. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.232

Stellingwerf, H.M., Laporte, G., Cruijssen, F.C.A.M., Kanellopoulos, A., Bloemhof, J.M., 2018. Quantifying the environmental and economic benefits of cooperation: A case study in temperature-controlled food logistics. Transportation Research Part D: Transport and Environment 65, 178–193. https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.08.010

Tang, X., Lehuédé, F., Péton, O., 2016. Location of distribution centers in a multi-period collaborative distribution network. Electronic Notes in Discrete Mathematics 52, 293–300. https://doi.org/10.1016/j.endm.2016.03.039

Ubeda, S., Arcelus, F., Faulin, J., (2011). Green logistics at Eroski: a case study. International Journal of Production Economics, 131(1), 44 - 51.

Vanovermeire, C., Sörensen, K., 2014. Measuring and rewarding flexibility in collaborative distribution, including two-partner coalitions. European Journal of Operational Research 239, 157–165. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.015

Vaziri, Sh., Etebari, F., Vahdani, B., 2019. Development and optimization of a horizontal carrier collaboration vehicle routing model with multi-commodity request allocation. Journal of Cleaner Production 224, 492–505. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.043

Verdonck, L., Beullens, P., Caris, A., Ramaekers, K., Janssens, G.K., 2016. Analysis of collaborative savings and cost allocation techniques for the cooperative carrier facility location problem. Journal of the Operational Research Society 67, 853–871.https://doi.org/10.1057/jors.2015.106

Verdonck, L., Caris, A. N., Ramaekers, K. & Janssens, G. K. (2013). "Collaborative Logistics from the Perspective of Road Transportation Companies". Transport Reviews, 33, 700-719. 10.1080/01441647.2013.853706

Wang, X., Kopfer, H., 2015. Rolling horizon planning for a dynamic collaborative routing problem with full-truckload pickup and delivery requests. Flex Serv Manuf J 27, 509–533. https://doi.org/10.1007/s10696-015-9212-8

Wang, X., Kopfer, H., 2014. Collaborative transportation planning of less-than-truckload freight: A route-based request exchange mechanism. OR Spectrum 36, 357–380. https://doi.org/10.1007/s00291-013-0331-x

Wang, X., Kopfer, H., Gendreau, M., 2014. Operational transportation planning of freight forwarding companies in horizontal coalitions. European Journal of Operational Research 237, 1133–1141. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.056

Wang, Y., Zhang, S., Guan, X., Peng, S., Wang, H., Liu, Y., Xu, M., 2020. Collaborative multi-depot logistics network design with time window assignment. Expert Systems with Applications 140, 112910. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112910

Wang, Yong, Ma, X., Li, Z., Liu, Y., Xu, M., Wang, Yinhai, 2017a. Profit distribution in collaborative multiple centers vehicle routing problem. Journal of Cleaner

Production 144, 203–219. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.001

Wang, Yong, Ma, X., Liu, M., Gong, K., Liu, Y., Xu, M., Wang, Yinhai, 2017b. Cooperation and profit allocation in two-echelon logistics joint distribution network optimization. Applied Soft Computing 56, 143–157. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.02.025

Wang, Yong, Peng, S., Xu, C., Assogba, K., Wang, H., Xu, M., Wang, Yinhai, 2018a. Two-echelon logistics delivery and pickup network optimization based on integrated cooperation and transportation fleet sharing. Expert Systems with Applications 113, 44–65. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.037

Wang, Yong, Zhang, J., Assogba, K., Liu, Y., Xu, M., Wang, Yinhai, 2018b. Collaboration and transportation resource sharing in multiple centers vehicle routing optimization with delivery and pickup. Knowledge-Based Systems 160, 296–310. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.07.024

Wang, Yong, Zhang, S., Assogba, K., Fan, J., Xu, M., Wang, Yinhai, 2018c. Economic and environmental evaluations in the two-echelon collaborative multiple centers vehicle routing optimization. Journal of Cleaner Production 197, 443–461. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.208

Weng, K., Xu, Z., 2014. Flow Merging and Hub Route Optimization in Collaborative Transportation. Journal of Applied Mathematics 2014, 1–8. https://doi.org/10.1155/2014/621487

Wick, C., Klumpp, M., Kandel, C., 2011. Shapley value simulation for allocating GHG emission savings due to logistics pooling within ecr cooperations 6.

Xu, Xiaozhou., Pan, Shenle., Ballot, Eric., 2012. Allocation of Transportation Cost & CO2 Emission in Pooled Supply Chains Using Cooperative Game Theory. IFAC Proceedings Volumes 45, 547–553. https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00078

Yilmaz, O., Savasaneril, S., 2012. Collaboration among small shippers in a transportation market. European Journal of Operational Research 218, 408–415. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.018

MODELISATION DU PROGRAMME DIRECTEUR DE PRODUCTION EN VUE DE LA TRANSITION NUMERIQUE DES PME MANUFACTURIERES

Estefania TOBON VALENCIA, Samir LAMOURI

LAMIH, Arts et Métiers Paristech
Paris, France
estefania.tobon-valencia@ensam.eu,
samir.lamouri@ensam.eu

Robert PELLERIN[1], Alexandre MOEUF[2],

[1] Département Mathématiques et Génie Industriel,
Polytechnique Montréal, Canada
robert.pellerin@polymtl.ca
[2]Exxelia, France
alexandre.moeuf@exxelia.com

RESUME : *Cet article s'intéresse à la transformation du processus de planification des PME (Petites et Moyennes Entreprises) manufacturières dans le cadre de la quatrième révolution industrielle. Notre étude se concentre sur le PDP (Programme Directeur de Production) . Pour identifier les opportunités d'amélioration du PDP de ce secteur, une cartographie du processus actuel de planification a été élaborée au sein d'un groupe de PME manufacturières. Elle a montré que les acteurs ont besoin d'outils pour supporter la prise de décision, pour améliorer la qualité des données d'entrée et pour proposer des plans qui s'adaptent rapidement aux contraintes internes et externes de l'environnement de production. Nous proposons ici l'intégration de divers groupes de technologies de l'industrie 4.0 aux activités du PDP. Notre proposition permettra aux PME de guider les étapes initiales de la transformation numérique de ce processus de planification et invite les chercheurs à apporter des solutions adaptées à ce secteur à travers plusieurs perspectives de recherche.*

MOTS-CLES : *PDP, Industrie 4.0, PME, Gestion de production, Modélisation BPMN, Agilité*

1 INTRODUCTION

Les technologies et les outils numériques associés au concept d' Industrie 4.0 offrent aux entreprises diverses possibilités pour exécuter, contrôler, optimiser et automatiser leurs processus. Ainsi, différents objectifs sont au cœur des projets industriels du passage au numérique, tels que : la réduction des coûts, l'amélioration de la productivité, une meilleure qualité, l'agilité et la proposition de solutions plus adaptées aux besoins des clients (CEFRIO, 2016 ; Joblot *et al.*, 2019 ; Raymond, 2005).

Depuis quelques années, les PME cherchent à intégrer les avancées technologiques du 4.0 dans leurs processus métier. Toutefois, en raison d'un manque d'expertise technique, les projets de transition numérique peuvent s'avérer complexes pour ce type d'entreprise (Moeuf, et al., 2019). Les PME ont en conséquence besoin de méthodes leur permettant de guider la transformation numérique (Gamache et Abdul-Noir, 2019). Peu d'études scientifiques se sont intéressées aux activités de planification à moyen terme et adaptées au contexte industriel et organisationnel des PME (Tobón Valencia *et al.*, 2019).

Nous proposons dans cet article un modèle d'intégration de groupes technologiques 4.0 dans le processus PDP des PME manufacturières. Nous présentons dans la première section la théorie du processus PDP. Ensuite, nous présentons une cartographie des activités de ce processus qui repose sur des observations au sein d'un groupe de PME et une modélisation BPMN. Cette cartographie nous a permis de soulever plusieurs difficultés associées au processus PDP au sein des PME que nous détaillons à la fin de la troisième section. Nous proposons dans la quatrième section un modèle d'intégration des technologies 4.0 à un groupe d'activités du processus PDP. Ce modèle ouvre la voie à plusieurs opportunités de recherche que nous évoquons en conclusion dans la dernière section.

2 PDP

Dans un horizon de planification à moyen terme, le PDP définit au niveau des articles directeurs les quantités qui doivent être produites dans chaque période de l'horizon de planification afin de satisfaire la demande des clients dans des conditions de production optimales. Il s'agit d'un processus complexe et essentiel pour traduire les objectifs stratégiques en programmes de production faisables.

Le PDP est une base importante pour la communication entre la gestion des commandes clients et la production. Il permet au service commercial de définir les quantités qui peuvent être réservées aux clients et les dates auxquelles les commandes des clients peuvent être livrées (Jonsson et Ivert, 2015). Deux des trois objectifs du PDP peuvent être récupérés de cette définition, soient assurer la satisfaction des clients à travers le respect des délais de livraison, tout en contrôlant les niveaux des stocks (APICS, 2011 ; Perrot et Villumus, 2018).

Le processus PDP a deux livrables principaux. Le premier livrable est un programme de production qui indique les quantités de produits finis à fabriquer par semaines dans l'horizon PDP. Le second livrable est un programme d'entrée pour l'ordonnancement qui indique le moment de production de chaque ordre de fabrication.

Comme mentionné par Jonsson et Ivert (2015), il existe une différence entre les résultats du PDP et les objectifs que l'entreprise cherche à atteindre avec ce processus. Le PDP indique ce qui doit être produit en fonction d'un ou plusieurs objectifs suivants : augmenter la productivité, utiliser au mieux la capacité disponible, améliorer le service client et maintenir les stocks à un niveau souhaité.
Il y a deux méthodes principales de planification du PDP, par gestion de stock et par exploitation de la connaissance des besoins futurs (Baglin, et al., 2015). La première méthode fait appel à l'utilisation des méthodes de gestion de stock pour gérer le réapprovisionnement. La seconde méthode exploite les prévisions de vente et les commandes fermes pour faire une projection de stock prévisionnel et prendre les décisions de réapprovisionnement sur cette base. Cette méthode permet de répondre aux besoins clients et de minimiser le stock de produits finis.
Nous allons baser notre proposition sur la méthode d'exploitation des prévisions de vente et commandes fermes. Sur cette logique, le processus PDP est réalisé par quatre sous-processus fondamentaux : la planification de la demande, la planification de la capacité et des approvisionnements, la réunion PDP et la gestion de la capacité suite aux CBN (calculs de besoins nets) . Nous présentons brièvement ces activités dans chaque sous-processus par la suite.

2.1 Définition des paramètres généraux

Avant d'aborder la planification PDP, il est essentiel de définir les paramètres généraux ou donnés d'entrée du PDP. D'abord, il faut identifier les ressources critiques ou goulets. Ces postes ont une capacité contrainte qui rythme le flux de production. À partir de cette identification, il sera possible de déterminer le plus long délai de fabrication.
Ensuite, il est indispensable d'identifier les articles directeurs. Ces articles doivent être associés à l'une des familles du PIC (Plan Industriel et Commercial). Leur processus de fabrication alloue les mêmes postes de charge et des temps de fabrication similaire. Ceci permet de leur attribuer une macro-gamme. Au niveau de leur structure, ils nécessitent des composants et matières premières similaires, il est donc possible d'y associer une macro-nomenclature.
Un autre paramètre qui doit être déterminé est l'horizon du PDP. Cet horizon doit avoir une valeur maximale équivalente à la somme des plus longs délais d'approvisionnement et de fabrication. La valeur minimale de cet horizon peut être le plus long délai de fabrication.
Enfin, il est important de traduire les objectifs de l'entreprise pour le PDP en indicateurs de performance : nombre de commandes en retard, niveaux des stocks de produits finis et approvisionnements, adhérence au PDP, coûts associés aux ajustements PDP. La valeur cible de ces indicateurs doit aussi être déterminée.
L'entreprise doit définir la fréquence de mise à jour de ces paramètres pour l'incorporer comme activité du processus. Il est également important d'effectuer une mise à jour des données techniques employées dans ce processus : commandes et prévisions de demande, stocks des produits finis, stocks des approvisionnements, gammes et nomenclatures (Baglin, et al., 2015).
Pour donner suite à la définition ou à la mise à jour des paramètres et des données techniques, les sous-processus que nous présentons dans les sections suivantes sont exécutés.

2.2 Planifier la demande

La demande du PDP est composée de quatre éléments principaux, la demande du PIC, les besoins confirmés, les besoins non confirmés et les commandes en retard.
Les activités de ce sous-processus cherchent à désagréger la demande du plan de ventes du PIC par article directeur PDP, à mettre à jour les dates de commandes fermes et les hypothèses de la demande (besoins non confirmés). Finalement, il est nécessaire de mettre à jour et d'incorporer dans le calcul de la charge les commandes en retard.

2.3 Planifier la capacité et les approvisionnements

Ce sous-processus comporte trois activités principales : la proposition d'un PDP faisable, l'analyse des charges globales et la définition d'un plan de base pour l'ordonnancement des ordres de fabrication.
La proposition d'un PDP faisable commence par une évaluation des indicateurs de performance du PDP de la semaine précédente. Si ces valeurs sont égales à la cible, il est possible de proposer un PDP pour la demande validée dans le sous-processus précédent. En revanche, s'il y a des écarts entre les valeurs réelles des indicateurs et leur cible, il est nécessaire de déterminer s'il s'agit d'un problème associé aux données de capacité ou bien des données de calcul de la charge. Pour donner suite à cette vérification, les données modifiées doivent être mises à jour.
Pour donner suite à ces corrections, il est important de vérifier la disponibilité des approvisionnements (matières premières, composants, sous-ensembles) pour pouvoir proposer un PDP et conduire l'analyse de charges globales. Ce dernier cherche à déterminer si la capacité disponible dans les goulets est suffisante pour traiter la charge induite par le PDP.
Le PDP permet de proposer un plan d'entrée pour l'ordonnancement qui indique les dates de début et de fin de traitement de chaque commande. Il permet également de calculer le disponible à la vente (les quantités qui peuvent être vendues sans entraîner une modification du PDP). Finalement, il permet de calculer le retard sur les commandes. Ainsi, les coûts associés à ce retard peuvent être déterminés.

2.4 Déroulement de la réunion PDP

Cette réunion a trois objectifs principaux : communiquer la performance du PDP de la période précédente, déterminer les actions à lancer pour donner suite à cette performance et valider le PDP de la période suivante.
La performance du PDP de la période précédente est évaluée à travers les indicateurs de performance définis dans le sous-processus 1. Leurs valeurs permettront d'identifier les risques et problèmes associés (disponibilité des composants, au niveau des stocks et à la capacité disponible. S'il est nécessaire d'améliorer la valeur d'un indicateur, des actions doivent être mises en place. Ces actions doivent être standardisées. Par exemple, quand il y a du retard, afin de livrer dans les meilleurs délais, les actions à lancer peuvent être : travailler en heures supplémentaires, embaucher du personnel, recourir à de la sous-traitance, utiliser la polyvalence et/ou diminuer le temps de réglage.
Pour donner suite à la définition de ces actions, il s'agit de présenter l'analyse des charges globales et le plan de production au niveau des articles directeurs pour la période suivante. La réunion se termine avec la validation de ces éléments.

2.5 Ajuster le PDP pour donner suite au CBN

Pour donner suite au CBN, il est important de vérifier s'il est nécessaire de modifier le plan d'entrée de l'ordonnancement qui avait été proposé dans le sous-processus 3. En outre, le CBN permettra de définir les priorités de ce plan.
Ensuite, le processus d'ordonnancement pourra se dérouler. Il est indispensable à ce point de faire un suivi des entrées sorties (contrôle de flux de charges), pour comparer la charge planifiée par rapport à la production réelle. Ceci permettra de calculer l'adhérence au PDP et de mettre à jour les niveaux de stocks des produits finis.
Le processus PDP est en conséquence complexe. Il rassemble beaucoup d'activités et une prise de décisions importante. Nous allons nous concentrer sur le sous-processus 3 dans les sections suivantes.

3 CARTOGRAPHIE LE PROCESSUS PDP OBSERVES DANS LES PME

Dans le but de proposer un guide approprié pour la transformation du processus PDP traditionnel au sein des PME, il a été nécessaire d'abord de modéliser le processus PDP actuel au sein d'un groupe de PME. Nous avons conduit une étude Delphi-Régnier avec les intervenants de ce processus pour formaliser les activités, les outils et recenser les difficultés.
Nous présentons dans la figure 1 une cartographie du sous-processus 3 actuel, « Planifier la capacité et les approvisionnements ». Dans cette cartographie, le sous-processus 2 de notre partenaire industriel est similaire au processus « Ajuster PDP pour donner suite au CBN » que nous avons décrit dans la section précédente.

3.1 Modélisation BPMN

La modélisation BPMN a été retenue pour modéliser le processus PDP. La version BPMN 2.0 (de l'anglais *Business Process Modelling Notation*) a été proposée en 2011 par l'Object Management Group (OMG). Le standard est disponible en ligne sur le site suivant : http://www.bpmn.org/
Le BPMN permet d'avoir une notation compréhensible par toutes les personnes participant à la conception d'un processus. Ainsi, le personnel responsable de modéliser le processus, les développeurs techniques responsables de déployer l'architecture technologique pour exécuter le processus et les responsables du contrôle du processus utilisent un standard de modélisation commun (White, 2004).

3.2 Discussion processus PDP T0

Pour donner suite à la modélisation du sous-processus actuel de notre partenaire industriel, nous avons constaté qu'il y a des difficultés associées aux outils et au processus. Quant aux outils technologies et systèmes d'information employés dans les activités du PDP, nous avons remarqué que la plupart des activités de calcul sont faites à l'aide d'outils conçus sur Excel. Aucun groupe technologique du 4.0 n'est actuellement employé dans le processus de planification.
Selon l'échelle proposée par le CEFRIO (2016), le processus PDP actuel a un niveau discipliné parce qu'il est soutenu par un ERP. Cependant, les autres outils informatiques utilisés ne sont pas intégrés avec l'ERP.
Les difficultés du processus de planification sont diverses. Tout d'abord, il y a un problème de délégation des fonctions. Le chef planificateur est responsable de plusieurs activités qui pourraient être réalisées par d'autres acteurs du processus PDP. D'autres activités, comme la mise à jour des dates de fin de fabrication sur les lignes de commandes, demandent beaucoup de temps de la part du chef planificateur. Cette mise à jour est faite manuellement dans l'ERP au niveau de chaque commande. Dans le quotidien de l'entreprise, beaucoup d'activités que nous avons modélisées ne sont pas faites par un manque de temps par le chef planificateur.
Le PDP n'est pas actuellement importé dans l'ERP. En conséquence, le CBN n'est pas relié à ce programme.
Les objectifs du PDP n'ont pas été clairement définis. Les indicateurs de performance n'ont pas non plus été précisés. En conséquence, la performance du PDP n'est pas mesurée.
Nous avons également constaté un manque de processus de communication entre les différents acteurs. Le chef planificateur est au cœur de tous les échanges. La plupart des informations sont transmises à l'oral ou échanges de courriels sans être enregistrées dans une base de données ou des rapports.
Les difficultés précédentes expliquent les risques d'apparition de :

- retards dans l'expédition des commandes clients ;

- problèmes de communication entre les interlocuteurs ;
- l'incapacité de gérer des aléas ou évènements inattendus et d'adapter le plan par rapport à ces aléas.

En outre, nous n'avons pas pu identifier aucune forme d'agilité dans le processus PDP actuel.
En vue des difficultés identifiées, nous proposons d'intégrer les technologies 4.0 aux activités du processus PDP.

4 PDP 4.0

En l'absence de modèles d'intégration des technologies 4.0 aux approches de planification à moyen terme (Tobón Valencia *et al.*, 2019), il était nécessaire de passer par la consultation d'experts. Nous avons invité un groupe de six experts en Industrie 4.0 à deux ateliers de travail collaboratif. Les objectifs de ces ateliers étaient d'identifier les activités pouvant bénéficier de l'exploitation des groupes technologiques 4.0, pour ensuite sélectionner la technologie la plus adaptable et finalement déterminer la portée attribuée au PDP 4.0.
Nous avons considéré les dix groupes technologiques qui ont été identifiés par le CEFRIO (2016) comme piliers de la quatrième révolution industrielle: les systèmes cyber-physiques (CPS), l'internet des objets (IdO), l'infonuagique, les sciences des données, la cybersécurité, les robots/machines autonomes, la réalité augmentée, les systèmes de simulation, les technologies de communication entre machines et l'intelligence artificielle (IA).
Nous avons modélisé l'association de ces technologies aux activités PDP à l'aide de la méthodologie BPMN. Nous avons ajouté un couloir que nous avons nommé « Technologies 4.0 », dans lequel nous avons déplacé les activités qui exploitent des groupes technologiques 4.0. Nous avons également ajouté le symbole suivante 📶 sur le coin inférieur droit de ces activités.
Nous avons considéré quatre niveaux pour déterminer la portée du PDP 4.0 : surveillance, contrôle, optimisation et autonomie. Le CEFRIO (2016) a défini ces niveaux :

- la surveillance permet d'identifier des changements de situation ou de performance dans le processus à travers des capteurs et des sources de données extérieures ;
- le contrôle rend possible l'interaction entre l'utilisateur et le système pour corriger, personnaliser ou améliorer la performance ;
- l'optimisation intègre l'exploitation des données récupérées du niveau de surveillance avec la capacité de contrôler le système pour faire face aux aléas sans détériorer la performance du système ;
- l'autonomie associe tous les niveaux précédents pour que le système soit capable de s'adapter en temps réel aux préférences de l'utilisateur.

Lors de séances de travail avec les experts, nous avons étudié chaque sous-processus PDP que nous avons décrit dans la section 2. Nous présentons par la suite une synthèse de ce travail pour le sous-processus 3 « Planifier la capacité et les approvisionnements ». Le modèle BPMN de ce sous-processus est présenté dans la figure 2. Les activités seront identifiées par la suite avec le numéro que nous avons associé dans cette figure. Les événements intermédiaires que nous y présentons comme sous-processus correspondent à ceux que nous avons présentés dans la section 3.

4.1 Intégration technologies 4.0 aux activités de planification de la capacité et des approvisionnements

Pour déterminer la cause d'une mauvaise performance du PDP de la semaine précédente (activité 3.3 -Tn), les experts ont proposé de se servir de l'apprentissage automatique comme technique de l'IA. Pour pouvoir exploiter l'apprentissage automatique, il est nécessaire d'alimenter l'algorithme avec des données associées aux causes de la mauvaise performance et des solutions préalables. Ainsi, l'algorithme pourra proposer une solution en fonction de la cause de la mauvaise performance.
Si l'algorithme d'apprentissage automatique détermine que la cause est associée à la capacité, la simulation peut être exploitée pour modifier la capacité (activité 3.4 – Tn) et pour proposer différents scénarios de mise à jour de capacité (sous-processus 6 –Tn). Ensuite, le responsable de production peut sélectionner le meilleur scénario à l'aide des outils d'optimisation (activité 3.15 –Tn).
Si l'algorithme d'apprentissage automatique détermine que la cause de la mauvaise performance du PDP est associée aux données de la charge, la simulation peut être au service de l'activité 3.5 – Tn, pour proposer des modifications sur les macro-gammes ou bien sur les macro-nomenclatures. L'exploitation des données de flux de production récupérées à travers l'IdO ou des CPS (activité 3.10 – Tn), est importante pour la modification des données exploitées pour le calcul de la charge.
L'IdO peut aussi être utile lors de la vérification de la disponibilité des semi-finies ou des approvisionnements fabriqués en interne (activité 3.11 - Tn). Quant à la vérification de la disponibilité des composants, matières premières ou semi-finies approvisionnées des fournisseurs (activité 3.12 – Tn), l'utilisation de l'IdO ou des systèmes CPS avec de l'infonuagique a été proposée. L'analyse des niveaux d'inventaire des composants (activité 3.14 – Tn), pourrait exploiter l'apprentissage automatique pour faire des prévisions sur la disponibilité des matières dans l'entrepôt.
Lors de la proposition du PDP (activité 3.2 - Tn), les experts ont remarqué que l'exploitation de la simulation avec des outils d'optimisation permettrait d'obtenir un PDP en considérant plusieurs contraintes : rapport charge-capacité, utilisation optimale de la capacité disponible, décalage des dates d'expédition des commandes, variations capacitaires, entre autres. À l'aide de la simulation, plusieurs scénarios PDP peuvent être proposés.
Ensuite, des approches d'optimisation (heuristiques, métahéuristiques ou hybrides) permettront de valider

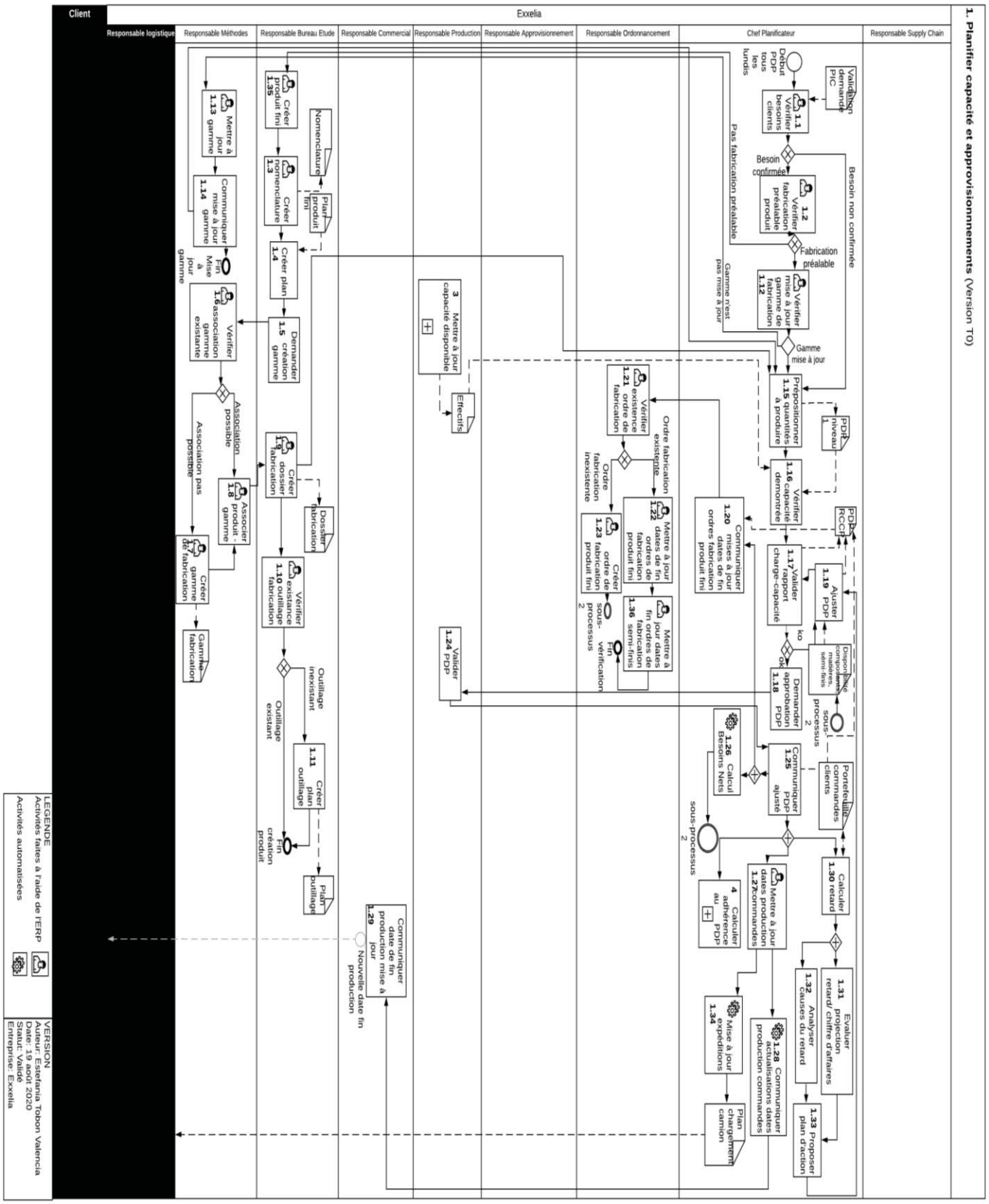


Figure 1 : Modèle représentant le sous-processus « Planifier capacité et approvisionnements » dans le processus PDP des PME manufacturières

les scénarios à partir des différents objectifs définis dans le processus PDP pour le niveau des stocks, les coûts des stocks, le retard, le licenciement et l'embauche des opérateurs, la cadence de production, le temps total de production et l'utilisation de la capacité.
L'activité 3.2 -Tn peut être complètement automatisée et proposer un PDP réalisable qui soit importé dans l'ERP (3.20 -Tn). Une autre alternative est de proposer pour donner suite à cette activité (3.2 – Tn) plusieurs PDP, pour permettre au chef planificateur de choisir le meilleur PDP en fonction des contraintes de production du moment. Le chef planificateur pourra ensuite effectuer des modifications à partir de ses connaissances (3.19 - Tn). Le choix parmi ces deux niveaux 4.0, automatisé et optimisé, dépendra du niveau de portée recherché par l'industriel avec le 4.0 (surveillance, contrôle, optimisation, autonomie).
Les coûts des variations capacitaires, de repositionnement de la charge et du retard sont exploités dans l'activité 3.27 - Tn, détermination des coûts associés aux changements PDP. Cette activité, qui cherche à estimer les coûts des changements associés au PDP, peut être faite à l'aide de l'apprentissage automatique.
La sortie de cet algorithme d'apprentissage automatique sera un coût estimé, plus ou moins proche du coût réel en fonction de la quantité et la qualité des données d'entrée.
La planification des dates de début et de fin des ordres de fabrication de produits finis (activité 3.24 – Tn), peut être faite avec la simulation pour incorporer les variations capacitaires. L'exploitation des approches d'optimisation sera ensuite nécessaire pour choisir le meilleur plan d'ordres de fabrication en fonction des objectifs de l'entreprise.
Le calcul de la valeur du retard (activité 3.26 –Tn), peut être fait avec de l'apprentissage automatique. Il s'agit d'une prédiction qui considère beaucoup de contraintes et de scénarios associés à des perturbations. L'utilisation d'une approche hybride, d'apprentissage automatique avec un algorithme heuristique ou métahéuristique, permettrait de diminuer le retard et de déterminer la priorité de traitement des ordres de fabrication (activité 3.25 – Tn). L'approche d'optimisation permettrait de vérifier la faisabilité du plan.

4.2 Discussion modèle planification de la capacité et des approvisionnements 4.0

L'atelier avec les experts nous a permis d'identifier deux axes d'amélioration principaux pour le PDP à l'aide des groupes technologiques 4.0. Ces axes sont associés à la surveillance et à l'optimisation.
Le premier axe concerne la fiabilisation des données d'entrée (paramètres du processus). Le pilotage des flux de production en temps réel permet d'une part de fonder les prévisions sur des données plus proches de la réalité et d'une autre part d'améliorer la réactivité des plans face aux aléas de production. Cet axe est associé à la surveillance. Pour les activités du PDP associées à ce niveau, l'IdO et les CPS ont été les groupes technologiques privilégiés par les experts pour récupérer les données en temps réel.
Une autre technologie 4.0 que les experts ont associée au niveau de surveillance est l'infonuagique. La récupération des données des systèmes d'information des fournisseurs, comme les dates de réception des approvisionnements, pourrait être faite en temps réel à l'aide de cette technologie. Les experts ont aussi signalé l'importance d'utiliser la cybersécurité pour accéder aux informations dans le nuage et protéger les systèmes d'information propres à l'entreprise, mais aussi ceux des fournisseurs.
Des autres utilités de l'infonuagique dans le processus PDP évoqué par les experts concernent :

- Le stockage des données de flux de production lorsque l'entreprise manque d'espace dans ses serveurs ou bien lorsque la puissance de calcul de l'entreprise pour les simulations et les calculs d'optimisation ne sont pas suffisants.
- Lors de la planification d'un réseau de production distribué géographiquement, pour permettre d'accéder aux données de flux de production en temps réel des sites de fabrication.

Le deuxième axe d'amélioration comporte l'exploitation des technologies 4.0 pour l'optimisation et le support dans la prise de décisions associées au PDP. La Simulation est la technologie que les experts ont privilégiée pour ce niveau de capacité. Les experts ont remarqué que l'exploitation des approches d'optimisation heuristiques et métahéuristiques s'avérait indispensable pour permettre de faire un choix parmi les scénarios proposés par la simulation.
L'apprentissage automatique comme technique de l'Intelligence artificielle a été employé aussi pour supporter la prise de décisions. Cette technique a été associée à des activités du PDP uniquement lorsque le décideur n'était pas capable de modéliser l'influence des différents paramètres sur l'objet qu'il cherche à calculer, par exemple dans la consolidation des prévisions de la demande (activité 3.3 – Tn). Étant donné que dans le processus du PDP le système et la valeur de paramètres sont souvent connus, les techniques de l'intelligence artificielle ont été très peu utilisées.
Mis à part de l'exploitation de l'IdO, les CPS, la cybersécurité et l'infonuagique pour les activités de pilotage des flux et de la simulation couplée avec des algorithmes d'optimisation ou de l'apprentissage automatique pour le support dans la prise de décisions, les experts ont jugé qu'il n'était pas nécessaire d'associer d'autres groupes technologiques 4.0 aux activités du PDP. La faisabilité du plan est la condition principale que le groupe d'experts a associée au processus PDP. En conséquence, ils considèrent qu'il est possible d'exploiter certaines technologies 4.0, mais il est essentiel de laisser la place à la prise de décisions des différents acteurs du processus PDP.

5 CONCLUSION

En fonction de la stratégie 4.0 définie par l'entreprise, l'automatisation des activités associées à la prise de décisions du PDP peut être plus ou moins élevée.

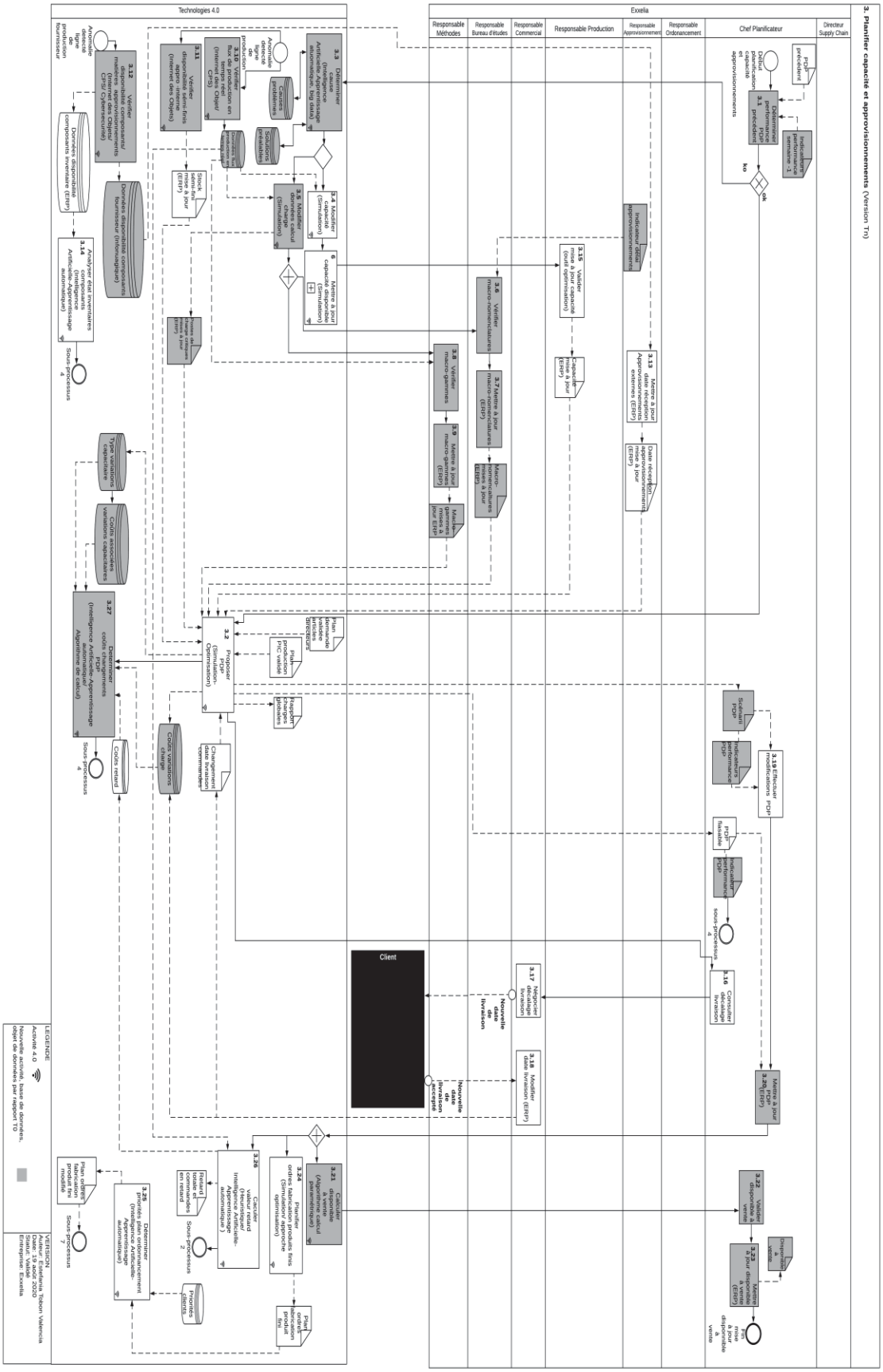


Figure 2 : Modèle représentant le sous-processus « Planifier capacité et approvisionnements 4.0 » dans le processus PDP 4.0 des PME manufacturières

Le sous-processus de planification de la capacité et des approvisionnements 4.0 que nous avons proposé porte sur les niveaux de surveillance et d'optimisation. Les technologies 4.0 permettent de supporter la prise de décisions des différents acteurs à travers l'exploitation des données des flux de production en temps réel et de l'ajustement des plans par le biais de la simulation et des approches d'optimisation.

À l'aide des experts, nous avons donné de la robustesse aux paramètres de ce sous-processus à travers le niveau de surveillance. Le niveau d'optimisation nous a permis de transformer les activités de calcul pour mieux supporter les activités de prise de décisions.

À travers l'intégration de certains groupes technologiques 4.0 nous avons proposé un sous-processus PDP 4.0 plus flexible et réactif. L'utilisation de certains groupes technologiques 4.0 nous a permis de proposer une nouvelle façon de faire certaines activités du PDP. La flexibilité a été atteinte à travers l'exploitation de la simulation pour l'analyse de plusieurs plans de production qui considèrent différents aléas. À l'aide des approches d'optimisation, les responsables de la prise de décisions du PDP peuvent sélectionner parmi ces plans celui qui permet d'atteindre les objectifs en respectant les contraintes du système à un moment donné.

La réactivité a été retrouvée à travers l'IdO ou les CPS pour piloter les flux de production en temps réel et vérifier la disponibilité des composants, matières premières et sous-ensembles en temps réel. Ces données sont utilisées pour proposer des plans PDP (PDP faisable et le plan d'entrée pour l'activité de l'ordonnancement) qui incorporent les changements de l'environnement interne (ateliers de production) et externe (fournisseurs) en peu de temps.

Le travail que nous avons conduit pour proposer le sous-processus planification de la capacité et des approvisionnements dans le PDP 4.0 correspond à la première étape de transition au 4.0. Une perspective de recherche concerne la mise en place de ce processus. À partir de ce modèle, les entreprises doivent d'abord sélectionner les technologies à déployer et les mettre en place après. Ensuite, les entreprises devront chercher à améliorer et à faire évoluer le processus. Il sera convenable à ce moment de mesurer les gains apportés par le 4.0 dans le processus PDP et d'identifier les nouvelles activités à améliorer.

Nous avons fondé la modélisation du processus PDP sur les besoins des PME manufacturières. Il serait, en conséquence intéressant de déterminer si le modèle PDP 4.0 que nous avons proposé est transposable à d'autres contextes industriels.

Une autre perspective de recherche concerne la modélisation BPMN 2.0. Le standard nous a permis de modéliser les processus PDP actuels (T0) sans aucune difficulté. En revanche, lors de la modélisation du processus PDP 4.0, nous avons dû personnaliser l'utilisation des éléments du standard. Ainsi, nous avons créé un couloir des groupes technologiques dans lequel nous avons placé les activités qui exploitent les technologies 4.0 et nous avons indiqué à l'intérieur des activités le groupe technologique 4.0 à utiliser. Lors de la modélisation des processus 4.0 il serait important de pouvoir spécifier pour chaque activité le groupe technologique, la portée (surveillance, contrôle, optimisation et automatisation), la fréquence d'exécution de l'activité, les coûts et les gains associés à l'exploitation de la technologie.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le groupe Exxelia pour nous avoir permis de conduire l'étude Delphi-Régnier au sein de ces sites de Chanteloup-en-Brie et Marmoutier et notre groupe d'experts pour leur participation dans les ateliers PDP 4.0.

REFERENCES

Alberts , F., Hammond, J. & Weil, D. 2003. *Power to the Edge: Command and Control in the Information Age.*

APICS The Association of Operations Management. 2011. *Basics of Supply Chain Management-Participant Guide Part I.*

Baglin, G., Lamouri, S. & Thomas, A. 2015. *Maîtriser les Progiciels ERP*. Paris: ECONOMICA.

CEFRIO. 2016. *Prendre part à la révolution manufacturière ? Du rattrapage technologique à l'industrie 4.0 chez les PME*. Disponible sur : https://cefrio.qc.ca/fr/realisations-et-publications/prendre-part-a-la-revolution-manufacturiere-industrie40/

Gamache, S. and Abdul-Noir, G. 2019. Stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 dans la PME manufacturière québécoise. *Dans 13ème conférence CIGI Qualita*. Montréal, Canada.

Joblot, L., Lamouri, S., Deneux, D., Paviot, T. 2019. Modélisation de processus métier en vue de la transition numérique des entreprises du secteur de la rénovation. *Dans 13ème Congrès International de Génie Industriel et Qualita, CIGI Qualita 2019*. Montréal, Canada.

Jonsson, P. et Ivert, L. K. 2015. Improving performance with sophisticated master production scheduling. *International Journal of Production Economics*. 168, p. 118–130. doi: 10.1016/j.ijpe.2015.06.012.

Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valenica, E., Eburdy, R. 2019. Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), p. 1384-1400.doi : 10.1080/00207543.2019.1636323

Perrot, A. et Villemus, P., 2015. *La boîte à outils de la Supply Chain*. 1st ed, pp. 94-95 . Paris: Dunod.

Raymond, L. 2005. Operations management and advanced manufacturing technologies in SMEs. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 16(8), p. 936-955

Tobón Valencia, E., Lamouri, S., Pellerin, R., Forget,P., Moeuf, A. 2019. Planification de la production et Industrie 4.0: Revue de la littérature. *Dans 13ème Congrès International de Génie Industriel et Qualita, CIGI Qualita 2019*. Montréal, Canada.

UTILISATION DES APPROCHES DE L'INDUSTRIE 4.0 ET DE L'INTERNET PHYSIQUE POUR LE DEPLOIEMENT D'ENTREPOTS URBAINS.

Aurélie Édouard, Samir Lamouri, Virginie Fortineau

Arts et Métiers
Paris, France LAMIH UMR CNRS 8201
aurelie.edouard@ensam.eu, samir.lamouri@ensam.eu,
virginie.fortineau@ensam.eu

Yves Sallez[1], Alexandre Berger[2]

[1]UPHF, Valenciennes, France LAMIH UMR CNRS 8201
yves.sallez@uphf.fr
[2]Le Groupe La Poste, France
alexandre.berger@laposte.fr

RÉSUMÉ : *La logistique urbaine est une branche importante de la « supply chain ». Elle englobe les activités de logistique et de transport dans les zones urbaines. Ce domaine de recherche suscite l'intérêt croissant des chercheurs. Dans cet article, nous abordons un nouveau concept : l'entrepôt urbain. Ce concept logistique orienté client vise à répondre aux défis de la livraison du dernier kilomètre. Pour ce faire, l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0, et de l'Internet physique est explorée. Puis une validation des contributions via un projet du groupe La Poste, qui vise à créer un laboratoire expérimental, est proposée.*

MOTS-CLES : *Systèmes urbains, chaînes logistiques, industrie 4,0, systèmes de production de services, livraison du dernier kilomètre, gestion d'entrepôts urbains.*

1 INTRODUCTION

La logistique est présentée comme une branche importante du Supply Chain Management dans la littérature. Elle peut être définie comme « *le processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle d'un flux, et de stockage efficace et effectif de biens, de services et d'informations connexes, du point d'origine au point de consommation, dans le but de se conformer aux exigences d'un client* » (Mentzer et al. 2001).

La logistique associée à la consolidation, au transport et à la distribution des marchandises dans les villes est appelée logistique urbaine. Cette notion a été décrite par Taniguchi comme « *le processus d'optimisation des activités de logistique et de transport réalisées par des entreprises privées dans les zones urbaines, tout en tenant compte de l'environnement, de la circulation, des embouteillages et de la consommation d'énergie dans le cadre d'une économie de marché* » (Dolati Neghabadi, Evrard Samuel, and Espinouse 2019).

Parmi les activités logistiques, cet article s'intéresse à la gestion des espaces de stockage urbains (entrepôts), qui sont une des composantes de la logistique urbaine. Un entrepôt est un point de stockage intermédiaire qui permet de lisser la relation entre le temps et la demande, peut assurer la distribution et offrir des services à valeur ajoutée (Higgins, Ferguson, and Kanaroglou 2012). Jusqu'à récemment, ces espaces de stockage de colis étaient situés dans les banlieues extérieures (Dablanc and Rakotonarivo 2010).

Les problèmes liés au changement climatique, la tendance à la croissance des ventes en ligne et la demande de livraison instantanée ont fait pression pour que l'on adopte des pratiques logistiques permettant de gagner du temps et que l'on mette en place les installations de traitement de commandes dans des endroits stratégiques ayant un accès direct aux marchés de consommation (Kang 2020). Par conséquent, les villes sont confrontées à la réintroduction d'espaces et d'installations logistiques dans les zones urbaines intérieures.

Face aux défis actuels du développement durable, de la rentabilité, de la traçabilité, de la satisfaction des clients et des livraisons du dernier kilomètre, l'objectif de cet article est de présenter un nouveau type d'entrepôt, un entrepôt urbain, et de proposer l'utilisation des approches de l'Industrie 4.0 et de l'Internet physique pour résoudre les problèmes de gestion de ces nouveaux espaces.
La suite du document est organisée comme suit : la section 2 présente un examen des défis de la logistique urbaine en termes d'impact sur les entrepôts et les problèmes à résoudre. La section 3 explique comment les concepts de l'Industrie 4.0 et de l'Internet Physique seront utilisés pour résoudre les problèmes des nouveaux entrepôts urbains qui ont été présentés. La section 4 introduit un cas d'application pour valider les contributions proposées. Enfin, la section 5 propose une discussion et une conclusion.

2 LES DÉFIS DE LA LOGISTIQUE URBAINE

2.1 Logistique urbaine

L'objectif final des efforts de logistique urbaine est d'accroître la prospérité d'une ville tout en atténuant les conséquences négatives telles que la pollution, le trafic et les impacts sur l'environnement.

Comme l'a indiqué (Dablanc and Rakotonarivo 2010) : « *la municipalité de Paris a eu tendance à négliger une dimension importante des questions de circulation des marchandises urbaines en région parisienne : la "fuite" vers la banlieue de nombreuses installations logistiques* ». Ce phénomène est appelé « étalement logistique » et correspond au déplacement des installations logistiques (entrepôts, transbordements, terminaux intermodaux, etc.) hors des limites d'une ville vers les zones suburbaines. Les zones urbaines intérieures constituent une offre très limitée de terrains commerciaux et industriels disponibles et abordables pour établir et exploiter des installations logistiques. En conséquence, la plupart des installations logistiques sont actuellement situées dans des grappes logistiques à la périphérie des zones métropolitaines, à proximité des réseaux routiers, des principaux aéroports et des ports maritimes.

Ce phénomène a augmenté les distances parcourues par les camions et les fourgonnettes nécessaires à la logistique du dernier kilomètre et a donc également accru les embouteillages et les impacts environnementaux. Compte tenu des enjeux actuels liés au changement climatique et des nouvelles demandes des clients, générées notamment par le commerce électronique (e-commerce), la stratégie de certains acteurs privés consiste à réintroduire ces espaces logistiques au sein des zones urbaines intérieures d'une métropole. De plus, le dernier kilomètre de la chaîne logistique est considéré comme l'une des parties les plus coûteuses, inefficaces et polluantes de la chaîne logistique (Gevaers, Van de Voorde, and Vanelslander 2009).

Le retour de ces espaces dans le centre-ville, et les défis liés aux livraisons du dernier kilomètre incitent les chercheurs et les acteurs de la chaîne logistique à repenser la structure des installations ainsi que leurs méthodologies de gestion afin de les adapter aux défis récents de la logistique urbaine. Il est tout d'abord intéressant de se poser la question : quels sont les enjeux de ces nouveaux entrepôts urbains ?

2.2 Livraisons du dernier kilomètre : un défi logistique pour les villes

Le développement du e-commerce a entraîné une augmentation rapide de la demande de nouveaux services de distribution urbaine, tels que la « livraison rapide », la « livraison le jour même » (allant parfois jusqu'à des options de livraison en 1 et 2 heures), la « livraison directe au consommateur ». Cela a occasionné d'importantes contraintes sur le trafic urbain (embouteillages, désagréments et inefficacité), l'environnement (émissions de gaz à effet de serre et gaspillage de ressources), le bien-être (bruit, accidents et santé publique) et la gouvernance (pénurie de terrains et expansion incontrôlée) (Hu et al. 2019) ; thèmes abordés dans de nombreuses publications. Cette tendance a également un impact sur la gestion des installations logistiques.

La logistique du dernier kilomètre s'effectue à partir d'un point de pénétration de la commande, comme l'entrepôt urbain présenté ci-dessus, jusqu'au point de destination préféré du destinataire final pour la réception des marchandises (Phuong 2020). Dans ce contexte, l'objectif principal de la logistique et de la gestion de la chaîne logistique reste le même : fournir un bon service (le bon produit au bon moment et au bon endroit) à un faible coût.

Nous nous intéressons à l'impact des enjeux de la logistique du dernier kilomètre sur les fonctionnalités et organisations attendues de l'entrepôt urbain, point de pénétration et élément majeur de cette logistique urbaine, en énonçant dans la prochaine partie les facteurs clés et actions associés à la réussite de la gestion d'un entrepôt urbain.

2.3 Questions relatives aux entrepôts

Les entrepôts remplissent les fonctions de base de réception, de stockage, de préparation des commandes et d'expédition (Yavas and Ozkan-Ozen 2020). Certains sont plus complexes et exercent également des activités de distribution et de valeur ajoutée. Les principales activités à valeur ajoutée sont (Grundey and Rimienė 2007) :

- Gestion logistique totale, contrôle des stocks et suivi ;
- Emballage, étiquetage ;
- Gestion des achats et des fournisseurs ;
- Retour des emballages vides, réparation, logistique inverse ;
- Personnalisation, ajout de pièces et de manuels ;
- Contrôle de la qualité, essais des produits ;
- Installation et instruction, formation sur les produits dans les locaux du client.

Entrepôts classiques	Entrepôts urbains
Grands espaces	Petites surfaces (quelques centaines de m²)
Situé en banlieue (Distance moyenne du centre-ville : 16 km)	Situé en centre-ville
Circulation rapide des marchandises	Accès direct aux marchés de consommation (derniers kilomètres) — Stock de proximité
Cross docking	Livraison en quelques heures
Utilisation des dispositifs traditionnels de gestion des flux tels que les convoyeurs, les élévateurs à fourche, les AGV...	Peu de clients
Installation standardisée pour l'ensemble de l'installation logistique	Défi d'optimisation de l'impact environnemental des bâtiments et des transports
	Offres personnalisées et sur mesure (espaces modulables, employés formés, veille technologique)

Tableau 1 : Spécifications des entrepôts urbains comparées à celles des entrepôts classiques

Certaines spécifications des entrepôts classiques exploitant les fonctions mentionnées doivent être adaptées à

l'environnement urbain. Le tableau 1 présente une brève comparaison entre les spécifications des entrepôts classiques provenant de (Higgins, Ferguson, and Kanaroglou 2012) et celles des entrepôts urbains (Berg and Zijm 1999).

Pour assurer les fonctions de base et les activités à valeur ajoutée dans le contexte de la logistique urbaine, les entrepôts urbains doivent relever de nombreux défis. (Yavas and Ozkan-Ozen 2020), (Juntao 2016), (Witkowski 2017) et (Shiau and Lee 2010) mettent en évidence six facteurs clés de succès résumés dans la figure 1.

Optimisation : l'optimisation des flux et des processus dans un entrepôt joue un rôle majeur : elle permet de gagner en performance. En effet, le travail sur la chaîne de valeur permet d'identifier et de réduire les déchets, les stocks et les activités de manutention inutiles et la perte d'espace.
Traçabilité : elle permet de connaître l'origine d'un produit et de suivre son cheminement tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Elle permet aux clients de suivre la progression de la préparation et de l'expédition de leurs commandes, et de gérer les flux physiques de la logistique inverse, et les objets consignés.
Fiabilité : une organisation et ses systèmes doivent être fiables afin de respecter les délais promis aux clients et d'éviter les erreurs d'enregistrement (enregistrement manuel). Le respect des délais est un gage de satisfaction des clients, et la qualité des données permet d'éviter des écarts d'inventaire et une perte d'informations dans le système d'information.
Réactivité : il s'agit d'améliorer l'organisation via le système d'information afin de donner la possibilité de regrouper les commandes pour un seul client ou encore gérer efficacement les erreurs de sélections.
Sécurité : il s'agit d'un facteur essentiel pour toute organisation. L'employeur doit assurer la sécurité de ses employés. L'aménagement et l'utilisation des installations doivent respecter certaines règles. Les entreprises doivent s'assurer que l'ergonomie des espaces de travail permettra de prévenir les troubles musculosquelettiques (TMS). L'entreprise doit également assurer la sécurité de ses données.
Flexibilité : la capacité d'une organisation à répondre rapidement aux fluctuations de la demande, tant en termes de volume que de variété (Duclos, Vokurka, and Lummus 2003). Ce facteur comprend la capacité de personnaliser les produits pour répondre aux demandes spécifiques des clients, d'ajuster la capacité pour répondre aux changements de quantités, de lancer des produits nouveaux, de fournir un accès généralisé aux produits et de répondre aux besoins d'un marché cible.

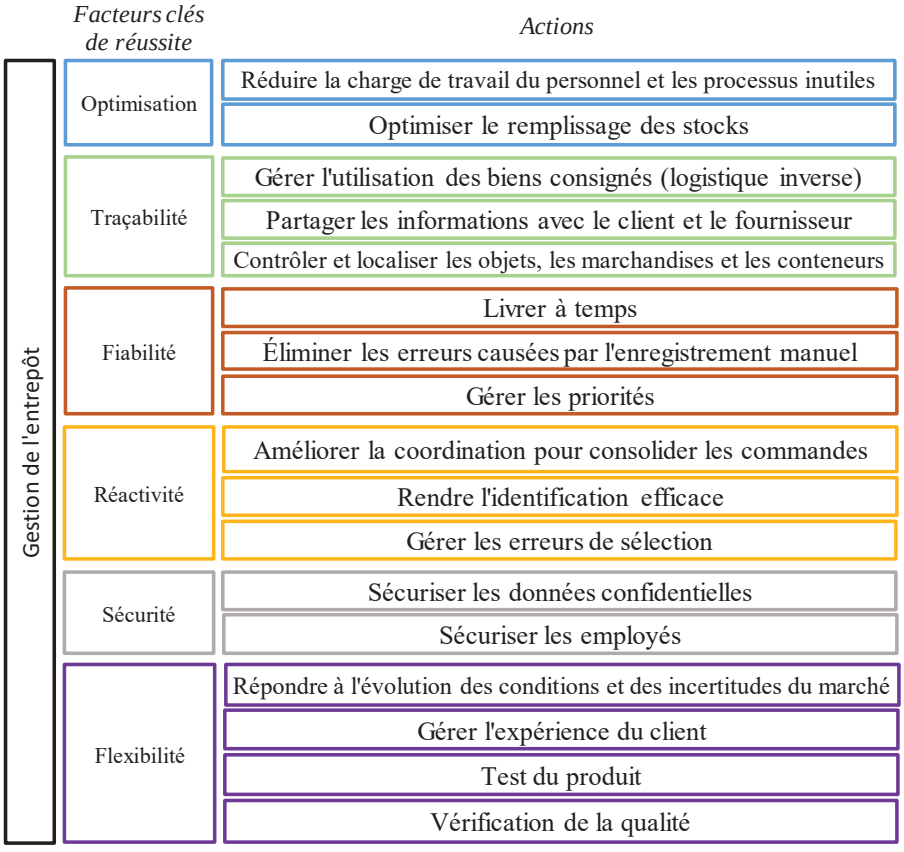


Figure 1 : Facteurs clés de réussite des entrepôts urbains

3 VERS UNE GESTION OPTIMALE DES ENTREPÔTS URBAINS

Comme évoqué précédemment, l'essor actuel du commerce électronique a entraîné une forte demande et une forte pression sur les services logistiques, et a renforcé l'importance de la logistique du dernier kilomètre. De nombreux articles présentent les méthodes et technologies de l'industrie 4.0 comme une opportunité pour répondre aux besoins des clients et contribuer au développement de la logistique et de la gestion de la chaîne logistique. En outre, le paradigme de l'Internet physique (IP) est de plus en plus souvent mentionné pour développer l'« *exploitation de réseaux d'approvisionnement interconnectés qui utilisent un ensemble de protocoles collaboratifs, de conteneurs modulaires et d'interfaces intelligents standards, pour accroître l'efficience et la durabilité* » (Pan et al. 2017). À notre avis, le couplage des concepts proposés par l'IP et les technologies de « l'industrie 4.0 » peut contribuer à résoudre les problématiques des nouveaux entrepôts urbains.

3.1 Revue de la littérature sur les technologies de l'Industrie 4.0 pouvant être appliquées aux questions de logistique urbaine

Dans la stratégie de la chaîne logistique, il existe des tensions entre des priorités concurrentes que sont le coût, la flexibilité, la rapidité et la qualité (Olsen and Tomlin 2020). Elle peut également inclure l'objectif de zéro émission, une priorité qui n'a que récemment été prise en considération. Les technologies soutenant l'Industrie 4.0 peuvent améliorer une ou plusieurs de ces priorités, individuellement ou en combinaison les unes aux autres. De nombreuses études, telles que « German Manufacturing 4.0 » (Cerfa 2018), mettent en évidence les technologies clés. Une enquête bibliographique a été menée pour identifier les principales catégories de technologie de l'industrie 4.0 qui sont applicables à la logistique urbaine.

Données massives (DM) : les processus logistiques génèrent une grande quantité de données, provenant de sources diverses récoltées sous différentes formes, tels que celles collectées par les technologies de l'IdO (Internet des Objets). Ces données se doivent d'être traitées rapidement. Leur collecte et évaluation complète aident à soutenir la prise de décision en temps réel. Les données massives permettent d'analyser et de séparer ce qui est important de ce qui ne l'est pas, aidant ainsi à tirer des conclusions et à soutenir un transfert de connaissances plus efficace pour atteindre les objectifs commerciaux (Witkowski 2017).
L'infonuagique ou Cloud Computing (CC) permet le traitement à grande échelle, il est peu coûteux et flexible pour le calcul et le stockage. Le CC permet un accès réseau permanent, la capacité d'augmenter ou de réduire la capacité à volonté et une localisation indépendante des groupements de ressources (Dopico et al. 2016).
Les systèmes cyber-physiques (SCP) contiennent deux composantes fonctionnelles principales : une connectivité avancée, qui assure la collecte de données en temps réel à partir du monde physique et le retour d'informations dans le cyberespace, et des fonctions intelligentes de gestion, d'analyse et de calcul des données pour construire le cyberespace (Lee, Bagheri, and Kao 2015).
Internet des objets (IdO) : cette technologie rend possible la création d'informations sans observation humaine. Ces informations sont utilisées par d'autres technologies tel que le M2M (Machine-to-Machine) qui permet aux appareils de terrain de communiquer et d'interagir entre eux (Rüßmann 2015). Selon (Olsen and Tomlin 2020), les étiquettes et les lecteurs d'identification par radiofréquence (RFID) promettent une révolution dans le suivi et la surveillance des stocks. Grâce à l'Internet des objets, il est possible de surveiller le processus de transport des marchandises, des colis et des lettres (Witkowski 2017). Le suivi et le traçage sont devenus plus rapides, plus précis, plus prévisibles et plus sûrs. En cas de retard, les clients peuvent être informés en temps réel.
Simulation et Jumeaux numériques (SJn) : Les données en temps réel sont utilisées pour refléter le monde physique, dans un « jumeau numérique » (modèle virtuel), qui peut représenter des machines, des produits et des personnes (Rüßmann 2015). Ils peuvent être utilisés pour tester, simuler et optimiser l'organisation et, par exemple, réduire le temps entre une commande prélevée et son expédition (Tjahjono et al. 2017).
L'intelligence artificielle (IA) utilise des ordinateurs pour simuler l'intelligence naturelle afin d'interpréter des données externes, d'apprendre à partir de ces données et d'utiliser cet apprentissage pour une analyse descriptive, prédictive ou normative (Tang and Veelenturf 2019).
Dispositifs autonomes/Robots (Da/R) : Les récents progrès en matière de technologie des capteurs et d'intelligence artificielle permettent le développement d'une nouvelle génération de technologies robotiques pouvant être déployées aux côtés de travailleurs humains (Olsen and Tomlin 2020). Ces robots collaboratifs sont appelés « cobots ». Leur déploiement implique l'automatisation de tâches manuelles qui peuvent entraîner des troubles musculosquelettiques (TMS). De plus, les exosquelettes peuvent aider les travailleurs à atténuer les blessures causées par le levage de lourdes charges dans l'entrepôt (Tang and Veelenturf 2019). De leur côté, les robots mobiles peuvent améliorer la productivité en amenant, par exemple, les produits directement aux employés pour le picking, l'emballage et l'expédition. De plus, les drones peuvent embarquer différents capteurs pour enregistrer des données (visuelles et audio) pour les opérations de surveillance et de contrôle. L'automatisation des activités est motivée par l'amélioration de la qualité (les robots peuvent effectuer des tâches plus précises que les humains et de manière répétée) ou de l'ergonomie en prévenant les TMS. (Olsen and Tomlin 2020).
Réalité Augmentée (RA) : les systèmes basés sur la réalité augmentée améliorent le monde physique grâce à des informations visuelles ou sensorielles générées numériquement. Ils permettent une variété de services, tels que la sélection de pièces dans un entrepôt, fournissant aux travailleurs des informations en temps réel pour améliorer la prise de décision et les procédures de travail (Rüßmann 2015).
Cybersécurité (Cyb) : De grandes quantités de données étant désormais disponibles via l'IdO, une entreprise

voudra stocker ces données de manière accessible, mais sécurisée. Une solution possible à ce problème de stockage est la blockchain. Il s'agit d'un registre de sécurité distribué. On peut y accéder et y écrire de n'importe où, ces données ne sont pas stockées dans un endroit central et, une fois qu'un bloc est ajouté à la chaîne, il ne peut plus être modifié (Olsen and Tomlin 2020).

Fabrication additive (FA) : également connu sous le nom d'impression 3D, il s'agit d'un processus qui prend une représentation numérique en 3D et produit l'objet physique correspondant (Olsen and Tomlin 2020). L'installation de machines 3D à proximité des entrepôts permettra d'imprimer rapidement à la demande une pièce requise, ce qui réduira les stocks et le transport (Rüßmann 2015). Cette technologie permet également de réduire les déchets tels que les emballages (Taniguchi, Thompson, and Yamada 2016). Elle peut également être utilisée pour produire de petits lots de produits personnalisés.

3.2 Le paradigme de l'Internet physique

Ce paradigme a été introduit pour la première fois par Benoit Montreuil (Benoit and Ballot 2014). L'objectif de l'Internet physique (IP) est de former un réseau logistique mondial ouvert, efficace, durable, résistant, adaptable et flexible, basé sur une interconnectivité physique, numérique et opérationnelle grâce à des normes, des interfaces et des protocoles standardisés au niveau mondial (Maslarić, Nikoličić, and Mirčetić 2016). L'IP exploite de nouveaux conteneurs modulaires (appelées PI conteneurs), ainsi que le développement de nouvelles interfaces de la chaîne logistique : centres logistiques équipés de nouvelles technologies de manutention et de stockage et les réseaux logistiques coopératifs. Les PI-conteneurs permettent d'encapsuler les marchandises dans des conteneurs mobiles verts « intelligents » de norme mondiale, avec des possibilités de communication entre eux en utilisant tous les avantages de l'IdO, ces caractéristiques « intelligentes » permettent d'utiliser pleinement les capacités de stockage et de transitique. Ces unités de charge peuvent se déplacer de manière optimale dans les réseaux logistiques grâce à leur capacité à communiquer entre elles et avec les ressources de transfert situées dans les plateformes logistiques (PI-hubs). De nombreuses études contribuent au développement des concepts associés à l'IP et promettent des solutions intéressantes dans un futur proche. Parmi celles-ci, certains développements concernant la livraison du dernier kilomètre ont été proposés, tels que des études de conception de réseaux de casiers intelligents utilisant des PI conteneurs qui démontrent que les conceptions modulaires peuvent fonctionner aussi bien que les conceptions à configuration fixe, tout en étant plus flexibles (Faugère and Montreuil 2017), (Faugère Louis and Montreuil 2018).

3.3 Nouvelle gestion des entrepôts urbains

Pour (Phuong 2020), les trois principales tendances technologiques pour la logistique du dernier kilomètre sont les données massives, l'Internet des objets et l'intelligence artificielle. Cela s'applique-t-il aux entrepôts urbains ? Quelles méthodes et technologies de l'industrie 4.0 identifiées dans la partie 3.1 répondent aux problèmes identifiés dans la partie 2.2 ? Les concepts proposés dans le cadre de l''Internet physique peuvent-ils également être utiles ? La figure 2 combine les actions présentées dans la figure 1 avec les groupes technologiques de l'industrie 4.0 et la solution IP.

En effet, pour chaque facteur clé de réussite ont été identifiées les actions à mettre en œuvre. L'objectif du présent article est de montrer que chaque action peut s'appuyer sur les outils de l'industrie 4.0 ou de l'Internet physique. La figure 2 présente les outils favorisant la mise en place de chaque action. Un prochain article visera à décrire plus en détail, grâce à un état de l'art, l'adaptation de chaque outil aux problématiques des entrepôts urbains. Par la suite, les travaux viseront à proposer une méthodologie de gestion des entrepôts urbains via l'implantation des technologies appropriées aux enjeux du dernier kilomètre décrits précédemment.

4 CAS APPLICATIF

Au Vietnam, les prestataires de services postaux traditionnels tels que VN Post, EMS et Viettel Post ont rejoint le secteur des services de distribution rapide (Phuong 2020). De manière similaire, le Groupe La Poste a décidé d'utiliser son maillage national et son réseau de facteurs (plus de 80 000 en France) pour livrer des marchandises sur tout le territoire français. Ce réseau permet une livraison « instantanée » dans les villes, si elle est associée à des moyens logistiques efficaces. Le groupe la Poste a donc envisagé de tirer parti d'un autre de ses atouts, la disponibilité de mètres carrés dans les centres-villes pour créer des entrepôts urbains appelés « City hub » (zones de stockage et points de livraison rapide). La société envisage d'en ouvrir plus de 30 d'ici 2025.Un projet exploratoire a commencé à Paris par la rénovation d'un espace de 600 m², situé dans une zone de forte activité au cœur de la ville. Cet espace vise à créer un laboratoire expérimental afin de maintenir l'avance du Groupe La Poste sur le marché et tenir ses objectifs. L'entreprise doit être en mesure d'offrir les meilleurs services en matière de gestion des stocks, de préparation des commandes, de livraison et de gestion des retours. Ce lieu vise à expérimenter les méthodes et technologies de l'Industrie 4.0 en réponse aux problèmes de la logistique urbaine, et plus précisément au défi de la livraison du dernier kilomètre, afin de développer des entrepôts urbains optimisés. Il permettrait également d'examiner les avantages que le paradigme de l'Internet physique pourrait apporter. Le projet est mené en collaboration avec des start-up et des écoles partenaires afin de s'assurer que les technologies du futur sont maintenues à jour.

De premières offres sont déjà proposées sur cet espace :

- Stockage compensatoire, préparation de commande et expéditions dans des bacs consignés de pièces automobiles pour un client B2B avec plusieurs offres de livraison entre H+2 à J+1 ;
- Préparation de commandes personnalisée avec test des produits (smartphones) pour un client B2C.

Gestion de l'entrepôt	Actions	Groupes technologiques										
		DM	CC	SCP	IdO	SJn	IA	Da/R	RA	Cyb	FA	IP
	Réduire la charge de travail du personnel et les processus inutiles			x		x	x	x				
	Optimiser le remplissage des stocks	x		x	x						x	x
	Gérer l'utilisation des biens consignés (logistique inverse)	x			x					x		x
	Partager les informations avec le client et le fournisseur		x		x					x		x
	Contrôler et localiser les objets, les marchandises et les conteneurs	x	x	x	x			x	x	x		x
	Livrer à temps				x			x				
	Éliminer les erreurs causées par l'enregistrement manuel				x			x		x		
	Gérer les priorités	x			x							
	Améliorer la coordination pour consolider les commandes	x			x							x
	Rendre l'identification efficace	x			x		x	x	x	x		
	Gérer les erreurs de sélection	x			x							
	Sécuriser les données confidentielles									x		
	Sécuriser les employés				x		x	x	x			
	Répondre à l'évolution des conditions et des incertitudes du marché	x				x		x				x
	Gérer l'expérience du client	x			x						x	
	Test du produit							x	x			
	Vérification de la qualité				x			x	x			

Figure 2 : Actions combinées aux groupes technologiques de l'Industrie 4.0

L'objectif est d'étudier et de tester des solutions sur des cas concrets tels que les offres présentées ci-dessus ou de développer des solutions afin de proposer de nouvelles offres. Tout d'abord, sur les offres existantes telle que pour les pièces automobiles, qui peuvent s'avérer très lourdes, l'utilisation de robots avancés telle que des exosquelettes pourrait être envisagée. De plus, la logistique inverse peut concerner les emballages réutilisables, ainsi que les marchandises endommagées ou les produits conçus pour être reconditionnés. La mise en œuvre de solutions de l'IdO et d'un système WMS basé sur le cloud doit être étudiée pour gérer ce flux.

Ensuite, la personnalisation d'une offre peut se faire à l'aide d'imprimantes 3D en créant des produits personnalisés. Cet outil pourrait également être utilisé pour réduire les niveaux de stock. De plus, la combinaison de l'IdO et des données massives pourrait permettre d'optimiser les stocks dans ces espaces restreints au sein des villes. Comme les offres de personnalisation se traduisent par des contrats courts, la planification de l'espace doit être flexible pour répondre rapidement aux changements de la demande, tant en termes de volume que de variété (Christopher 2000). Par exemple, la société a eu l'occasion en 2017 d'offrir un service personnalisé à la marque Adidas pour la distribution de chaussures de football haut de gamme personnalisable. L'utilisation d'outils de simulation et les jumeaux numériques pourraient permettre de travailler sur des scénarios avant d'utiliser des robots mobiles pour exécuter les choix de manière fluide et optimisée.

La dernière solution que l'on peut évoquer est l'utilisation du concept de PI conteneurs issus de l'Internet Physique afin de créer un système de colisage adapté aux chariots de La Poste, le CE 30 (figure 3). Ce moyen est équipé d'un système de sécurisation des produits et d'un système de suivi et d'acheminement afin d'en assurer le suivi ainsi que l'optimisation de son parcours. De plus, c'est un outil adapté aux problèmes d'impact environnemental, il est composé de boîtes réutilisables.



Figure 3 : Chariot de La Poste

Tous les éléments cités restent des suggestions. Face à la complexité des travaux, des compromis devront être faits afin de répondre au mieux aux problèmes de ces installations logistiques. Le travail doit commencer par la formalisation des attentes et la hiérarchisation des enjeux, suivie d'une proposition d'outils et de méthodes, d'études de faisabilité puis de tests.

5 CONCLUSION

Dans cet article, il a été montré que, pour relever les défis de la livraison du dernier kilomètre, il pourrait être intéressant de développer de nouveaux entrepôts urbains. Pour répondre aux attentes des clients et aux problèmes de logistique d'une ville, l'utilisation des méthodes et technologies de l'Industrie 4.0, ainsi que des éléments du paradigme de l'Internet Physique, semble être une piste intéressante à suivre.

Cette étude n'étant qu'une première démarche dans l'exploration de solutions pour la gestion des entrepôts urbains, la prochaine étape sera axée sur la validation d'un état de l'art de la combinaison des problèmes de ces installations et des groupes technologiques de l'Industrie 4.0 susceptibles de les résoudre. D'autres recherches porteront sur la proposition de solutions pour aider les gestionnaires d'entrepôts urbains à optimiser leurs installations.

RÉFÉRENCES

Benoit, Montreuil, and Eric Ballot. 2014. *L'Internet Physique : Le Réseau Des Réseaux Des Prestations Logistiques. Predit.* La Documentation Française.

Berg, J. P.Van Den, and W. H.M. Zijm. 1999. "Models for Warehouse Management: Classification and Examples." *International Journal of Production Economics* 59(1): 519–28.

Cerfa, Notes. 2018. *Transformation Numérique de l ' Industrie : L ' Enjeu Franco-Allemand*.

Christopher, Martin. 2000. "The Agile Supply Chain." *Industrial Marketing Management* 29(1) : 37–44.

Dablanc, Laetitia, and Dina Rakotonarivo. 2010. "The Impacts of Logistics Sprawl: How Does the Location of Parcel Transport Terminals Affect the Energy Efficiency of Goods' Movements in Paris and What Can We Do about It?" *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2(3): 6087–96.

Dolati Neghabadi, Parisa, Karine Evrard Samuel, and Marie Laure Espinouse. 2019. "Systematic Literature Review on City Logistics: Overview, Classification and Analysis." *International Journal of Production Research* 57(3): 865–87.

Dopico, M. et al. 2016. "A Vision of Industry 4.0 from an Artificial Intelligence Point of View." *Proceedings of the 2016 International Conference on Artificial Intelligence, ICAI 2016 - WORLDCOMP 2016*: 407–13.

Duclos, Leslie K., Robert J. Vokurka, and Rhonda R. Lummus. 2003. "A Conceptual Model of Supply Chain Flexibility." *Industrial Management and Data Systems* 103(5–6): 446–56.

Faugère, Louis, and Benoit Montreuil. 2017. "Hyperconnected Pickup & Delivery Locker Networks." *In Proceedings of the 4th International Physical Internet Conference* 6(July): 1–14.

Faugère Louis, and Benoit Montreuil. 2018. "Smart Locker Bank Design Optimization for Urban Omnichannel Logistics: Assessing Monolithic vs. Modular Configurations." *Computers and Industrial Engineering* (xxxx): 1–14.

Gevaers, Roel, Eddy Van de Voorde, and Thierry Vanelslander. 2009. "Characteristics of Innovations in Last Mile Logistics - Using Best Practices, Case Studies and Making the Link with Green and Sustainable Logistics." *Association for European Transport and contributors* (October): 1–8.

Grundey, Dainora, and Kristina Rimienė. 2007. "Logistics Centre Concept through Evolution and Definition." *Engineering Economics* 54(4): 87–95.

Higgins, C., M. Ferguson, and P. Kanaroglou. 2012. "Varieties of Logistics Centers." *Transportation Research Record* (2288) : 9–18.

Hu, Wanjie et al. 2019. "A Scientometrics Review on City Logistics Literature: Research Trends, Advanced Theory and Practice." *Sustainability (Switzerland)* 11(10): 1–27.

Juntao, Li. 2016. "Research on Internet of Things Technology Application Status in the Warehouse Operation." *International Journal of Science, Technology and Society* 4(4): 63.

Kang, Sanggyun. 2020. "Relative Logistics Sprawl: Measuring Changes in the Relative Distribution from Warehouses to Logistics Businesses and the General Population." *Journal of Transport Geography* 83(August 2019): 102636.

Lee, Jay, Behrad Bagheri, and Hung An Kao. 2015. "A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems." *Manufacturing Letters* 3 : 18–23.

Maslarić, Marinko, Svetlana Nikoličić, and Dejan Mirčetić. 2016. "Logistics Response to the Industry 4.0: The Physical Internet." *Open Engineering* 6(1) : 511–17.

Mentzer, John T et al. 2001. "DEFINING SUPPLYCHAIN MANAGEMENT." *Journal of Business* 22(2): 1–25.

Olsen, Tava Lennon, and Brian Tomlin. 2020. "Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management." *Manufacturing and Service Operations Management* 22(1) : 113–22.

Pan, Shenle, Eric Ballot, George Q. Huang, and Benoit Montreuil. 2017. "Physical Internet and Interconnected Logistics Services: Research and Applications." *International Journal of Production Research* 55(9): 2603–9.

Phuong, D T. 2020. "Last-Mile Logistics in Vietnam in Industrial Revolution 4 . 0 : Opportunities and Challenges." 115(Insyma): 172–76.

Rüßmann, Michael ; et al. 2015. "Industry 4.0: Future of Productivity and Growth in Manufacturing."

Boston Consulting (April).

Shiau, Jiun Yan, and Ming Chang Lee. 2010. "A Warehouse Management System with Sequential Picking for Multi-Container Deliveries." *Computers and Industrial Engineering* 58(3): 382–92.

Tang, Christopher S., and Lucas P. Veelenturf. 2019. "The Strategic Role of Logistics in the Industry 4.0 Era." *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review* 129(July): 1–11.

Taniguchi, Eiichi, Russell G. Thompson, and Tadashi Yamada. 2016. "New Opportunities and Challenges for City Logistics." *Transportation Research Procedia* 12(June 2015): 5–13.

Tjahjono, B., C. Esplugues, E. Ares, and G. Pelaez. 2017. "What Does Industry 4.0 Mean to Supply Chain?" *Procedia Manufacturing* 13 : 1175–82.

Witkowski, Krzysztof. 2017. "Internet of Things, Big Data, Industry 4.0 - Innovative Solutions in Logistics and Supply Chains Management." *Procedia Engineering* 182: 763–69.

Yavas, Volkan, and Yesim Deniz Ozkan-Ozen. 2020. "Logistics Centers in the New Industrial Era: A Proposed Framework for Logistics Center 4.0." *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review* 135(September 2019): 101864.

STUDY OF THE IMPACT OF QUAY CRANE PRODUCTIVITY RATE ON BERTH AND QUAY CRANE ASSIGNMENT AND SCHEDULING

Kaoutar CHARGUI

MOSIL research team, National School of Applied Sciences of Tetouan, University of Abdelmalek Essaadi, Mhannech, PB: 2222, Tetouan, Morocco.
Chargui.kaoutar@gmail.com

Tarik ZOUADI

Rabat Business School, BEAR Lab, International University of Rabat, Technopolis Shore Rocade 11100, Sala Al Jadida, Morocco.
Tarik.zouadi@uir.ac.ma

Abdellah EL FALLAHI

MOSIL research team, National School of Applied Sciences of Tetouan, University of Abdelmalek Essaadi, Mhannech, PB: 2222, Tetouan, Morocco.
aelfallahi@gmail.com

Mohamed REGHIOUI

MOSIL research team, National School of Applied Sciences of Tetouan, University of Abdelmalek Essaadi, Mhannech, PB: 2222, Tetouan, Morocco.
m.reghioui@gmail.com

ABSTRACT: *The integrated berth allocation and quay crane assignment and allocation is among the most addressed problems in the maritime related literature. The accuracy of this problem solutions depends on the precision of the resource's capacity estimation. Accordingly, in this paper, we investigate how the estimation error impacts the problem solutions. We focus on the quay cranes as being the main resources involved in serving the port customers vessels. We modelled the problem and tested different estimation errors scenarios for a dataset of instances. Computational results illustrated clearly the variation pattern of the problem solutions error over the capacity estimation error.*

KEYWORDS: *Berth allocation, quay crane assignment, quay crane scheduling, quay crane capacity.*

1 INTRODUCTION

Maritime logistics topic is set to become a widely investigated area in the literature due its very noticeable impact on the international trade (UNCTAD, 2018). Improving the port performance brings about various problems to be investigated especially the berth allocation, quay crane assignment and scheduling problems. The quality of this problem solutions depends mainly on how accurate the estimated resources capacities are. In this paper, we focus on the quay crane resources and we propose a model for this integrated problem inspired from a similar one in the literature. Then, we investigate how the quay cranes capacity estimation error influences the quality of the problem solutions. We conduct an experimental study to illustrate the impact of several estimation error values on the model objective value over a set of real based instances.

The remainder of this paper is as follows. Section 2 reports the most related past works regarding the topic addressed in this paper. A mathematical formulation of the studied problem is presented in Section 3. In Section 4, we report the results of the conducted experiments, then the paper ends with a conclusion and some potential lines for future work.

2 LITERATURE REVIEW

The berth allocation and quay crane assignment and scheduling problems were widely addressed in the literature and different formulation and algorithms were proposed to solve them (Bierwirth and Meisel, 2015; Li et al., 2015, Fu and Diabat, 2015; He et al., 2019). Recently, many contributions tended to integrate those problems in one single formulation due to the cost savings induced by that (Agra and Oliveira, 2018; Chen et al., 2013; Correcher and Alvarez-Valdes, 2017; Meisel and Bierwirth, 2012; Unsal and Oguz, 2013, Chargui et al., 2019). In most of past work, the performance rate of quay cranes was considered fix even though its estimation is subject to potential error. In fact, the capacity of a quay crane, which is expressed in terms of the number of containers moved per time period, is variant and dependent on many factors such as the characteristics of containers to be handled (Linn et al., 2013).

In the light of that, we investigate empirically the impact of the quay crane estimation error on the solution of the berth allocation and the quay crane assignment and scheduling integrated problem. For this, we modelled the problem based on the formulation proposed by Chargui et al. (2019) and conducted a set of experiments to highlight the variation.

3 MATHEMATICAL MODEL

3.1 Problem data

V Number of vessels.

P Number of bay sections across the quay.

T Number of time periods in the planning horizon.

C Number of quay cranes.

M Sufficiently large positive number.

r Processing rate of quay cranes.

D_{vp} Number of containers to handle on the bay p of vessel v.

J_v Arrival time of vessel v.

E_v Right berth position of vessel v.

F_v Left berth position of vessel v.

3.2 Decision variables

Q_{vt}^{pc} 1: if crane c is handling the bay p of vessel v at time period t. 0: otherwise.

y_v Service starting time of vessel v.

m_{tp} Performance rate of the quay crane on bay p at time period t.

H_{vtp} Number of containers remained to handle from bay p of vessel v at the beginning of time period t.

Z_{vtp} Number of containers remained on vessel v at bay p from time period $t-1$.

X_{vtp} Number of containers handled on vessel v at bay p at time period $t-1$.

s_{vt} 1: if vessel v is being served at time period t. 0: otherwise

I_v Total time needed to serve the vessel v.

3.3 Objective function

The objective of the model consists in minimizing the sum of vessels serving times. It's expressed as in equation (1).

$$Minimize \sum_{v=1}^{V} I_v \quad (1)$$

3.4 Constraints

$$\sum_{p=1}^{P}\sum_{v=1}^{V} Q_{vt}^{pc} \leq 1 \qquad (\forall t = 1..T, c = 1..C) \quad (2)$$

Constraints (2) ensure that at each time period a quay crane is at most assigned to one bay and one vessel.

$\sum_{c=1}^{C}\sum_{v=1}^{V} Q_{vt}^{pc} \leq 1 \quad (\forall t = 1..T, p = 1..P)$ (3)

Constraints (3) guarantee that at each time period a bay is allocated at most one quay crane and one vessel.

$m_{tp} \leq \sum_{c=1}^{C}\sum_{v=1}^{V} Q_{vt}^{pc} r \quad (\forall t = 1..T, p = 1..P)$ (4)

Constraints (4) determine the performance rate of the quay crane assigned to each bay at every time period. It's null if no quay crane is assigned to that bay at that time period.

$\sum_{c=1}^{C} Q_{vt}^{pc} \leq H_{vtp} M \quad (\forall t = 1..T, p = 1..P, v = 1..V)$ (5)

Constraints (5) ensure that, at each time period, if the remaining workload on each bay and every vessel is null, no quay crane will be assigned that bay.

$H_{vtp} = 0 \quad (\forall t = 1..T : t \leq J_v, p = 1..P, v = 1..V)$ (6)

Constraints (6) ensure that the remaining workload at every bay of a vessel is null before the arrival of that vessel.

$H_{vtp} \leq D_{vp}(t = y_v) + Z_{vtp} - X_{vtp} \quad (\forall t = 1..T : t \leq J_v, , p = 1..P, v = 1..V)$ (7)

Constraints (7) is used the calculate the handled amount at each time period.

$\sum_{t=1}^{T} X_{vtp} \geq D_{vp} \quad (\forall p = 1..P, v = 1..V)$ (8)

Constraints (8) ensure that the workload on each bay of a given vessel must be handled during the planning horizon.

$X_{vtp} \leq M \quad (\forall t = 1..T : t \leq J_v, , p = 1..P, v = 1..V)$ (9)

Constraints (9) guarantee that the number of containers handled on bay of a vessel at a given time period is null in case no crane was assigned that bay before.

$X_{vtp} \leq m_{t-1,p} \quad (\forall t = 2..T : t \geq J_v, , p = 1..P, v = 1..V)$ (10)

$X_{vtp} \geq m_{t-1,p} - M \quad (\forall t = 1..T : t \leq J_v, , p = 1..P, v = 1..V)$ (11)

Constraints (10) and (11) are used to calculate the number of containers handled during a time period that must be after the starting time to serve the vessel.

$Z_{vtp} \leq M(t \geq y_v + 1) \quad (\forall t = 2..T : t \geq J_v, p = 1..P, v = 1..V)$ (12)

$Z_{vtp} \leq H_{v,t-1,p} \quad (\forall t = 2..T : t \geq J_v, p = 1..P, v = 1..V)$ (13)

$Z_{vtp} \leq H_{v,t-1,p} - M\big(1 - (t \geq y_v + 1)\big) \quad (\forall t = 2..T : t \geq J_v, p = 1..P, v = 1..V)$ (14)

Constraints (12), (13) and (14) are used to calculate the remaining workload from each time period.

$\sum_{c1=1,c1<c}^{C}\sum_{p1=1,p1>p}^{P} Q_{vt}^{p1c1} r \leq M\big(1 - Q_{vt}^{pc} r\big) \quad (\forall t = 1..T, p = 1..P, v = 1..V, c = 1..C)$ (15)

Constraints (15) are added to avoid the interference between quay cranes.

$I_v \geq max_{t=1}^{T}\big(t(s_{vt} = 1)\big) - J_v + 1 \quad (\forall v = 1..V)$ (16)

Constraints (16) define the port stay of a vessel as the time interval between its arrival time and the last time period it was being served.

$\sum_{p=1}^{P} H_{vtp} \leq s_{vt} M \quad (\forall t = 1..T, v = 1..V)$ (17)

$s_{vt} \leq \sum_{p=1}^{P} H_{vtp} \ (\forall t = 1..T, v = 1..V)$ (18)

Constraints (17) and (18) ensure that the remaining workload of a vessel bay is null if it hasn't started being served yet.

$s_{v1t} \leq M \quad (\forall v1 = 1..V, v2 = 1..V : v1 \neq v2, t = 1..T : t \geq J_v)$ (19)

Constraints (18) are added to prevent physical contact of vessels.

$Z_{v1p} = 0 \quad (\forall p = 1..P, v = 1..V)$ (20)

Constraints (20) ensure that the workload remaining at the first time period is null.

$$X_{v1p} = 0 \qquad (\forall p = 1..P, v = 1..V) \qquad (21)$$

Constraints (21) ensure that the workload handled before the first time period is null.

$$Z_{vtp} \geq 0 \qquad (\forall t = 1..T, p = 1..P, v = 1..V) \qquad (22)$$

Constraints (22) ensure that the variable Z is positive.

$$H_{vtp} \geq 0 \qquad (\forall t = 1..T, p = 1..P, v = 1..V) \qquad (23)$$

Constraints (23) ensure that the variable H is positive.

$$X_{vtp} \geq 0 \qquad (\forall t = 1..T, p = 1..P, v = 1..V) \qquad (24)$$

Constraints (24) ensure that the variable X is positive.

$$m_{tp} \geq 0 \, (\forall t = 1..T, p = 1..P) \qquad (25)$$

Constraints (25) ensure that the variable m is positive.

$$y_v \geq 0 \quad (\forall v = 1..V) \qquad (26)$$

Constraints (26) ensure that the variable y is positive.

$$I_v \geq 0 \quad (\forall v = 1..V) \qquad (27)$$

Constraints (27) ensure that the variable I is positive.

$$Q_{vt}^{pc} \epsilon \{0,1\} \qquad (\forall v = 1..V, t = 1..T, p = 1..P, c = 1..C) \qquad (28)$$

Constraints (28) ensure that the variable Q is binary.

$$s_{vt} \epsilon \{0,1\} \qquad (\forall v = 1..V, t = 1..T) \qquad (29)$$

Constraints (29) ensure that the variable s is binary.

4 RESULTS

Table 1 reports the results of the study. In this study, we considered 50 instances generated based on real case data. For every instance, we solved the model 19 times. At each run, we modified the performance rate of quay cranes that we calculate as in equation (30) with A representing the estimated quay crane capacity and the reference capacity is given as 30. The two equations are used to calculate the gaps between the values. The objective function error is calculated as in equation (31) with B being the optimal objective value obtained using the estimated capacity and C is the optimal value found using the reference capacity 30. The averages of the objective functions values errors show that they increase as the estimation error increases and vice versa. Additionally, the objective values errors increase more significantly for the negative estimation errors compared to the positive ones.

$$Estimationerrorpercentage = \frac{A-30}{30} \qquad (30)$$

$$Objectivefunctionerror = \frac{B-C}{C} \qquad (31)$$

Table 1: The objective function errors over the estimation errors

	Estimation error percentage																			
	-30%	-27%	-23%	-20%	-17%	-13%	-10%	-7%	-3%	0%	3%	7%	10%	13%	17%	20%	23%	27%	30%
	Objective function error																			
Average	**48%**	**42%**	**36%**	**30%**	**25%**	**19%**	**16%**	**11%**	**8%**	**5%**	**0%**	**-2%**	**-4%**	**-8%**	**-11%**	**-12%**	**-15%**	**-18%**	**-20%**
Ecart type	**0,04**	**0,04**	**0,03**	**0,04**	**0,03**	**0,04**	**0,03**	**0,04**	**0,04**	**0**	**0,03**	**0,04**	**0,04**	**0,02**	**0,03**	**0,03**	**0,03**	**0,03**	**0,02**

5 CONCLUSION

As the accuracy of the integrated berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem solutions depends on the capacity estimation quality, we modeled the problem and conducted an experimental study to highlight the influence of the estimation error on the objective function values obtained using different scenarios of errors. The results showed that there is a significant impact of the error value on the optimal solution found for every instance. This work could be extended by proposing some methods to control the estimation error in order to reduce its impact on the planning solutions.

REFERENCES

Agra, A. and Oliveira, M. (2018). MIP approaches for the integrated berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem. European Journal of Operational Research, 264(1):138–148.

Bierwirth, C. and Meisel, F. (2015). A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. European Journal of Operational Research, 244(3):675–689.

Chargui, K., El fallahi, A., Reghioui, M., Zouadi, T. (2019), A reactive multi-agent approach for online (re)scheduling of resources in port container terminals, IFAC-PapersOnLine, 52(13):124-129.

Chen, L., Langevin, A., and Lu, Z. (2013). Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal. European Journal of Operational Research, 225(1):142–152.

Correcher, J. F. and Alvarez-Valdes, R. (2017). A biased random-key genetic algorithm for the time-invariant berth allocation and quay crane assignment problem. Expert Systems with Applications, 89:112–128.

Fu, Y.-M. and Diabat, A. (2015). A Lagrangian relaxation approach for solving the integrated quay crane assignment and scheduling problem. Applied Mathematical Modelling, 39(3):1194–1201

He, J., Yu, H., Tan, C., Yan, W., and Jiang, C. (2019). Quay crane scheduling for multiple hatches vessel considering double-cycling strategy. Industrial Management & Data Systems.

Li, W., Wu, Y., and Goh, M. (2015). Maritime Terminal Operational Problems. In Li, W., Wu, Y., and Goh, M., editors, Planning and Scheduling for Maritime Container Yards: Supporting and Facilitating the Global Supply Network, pages 5–29. Springer International Publishing, Cham.

Linn, R., Liu, J., and Zhang, Y.-w. W. a. C. (2013). Predicting the Performance of Container Terminal Operations using Artificial Neural Networks.

Meisel, F. and Bierwirth, C. (2012). A Framework for Integrated Berth Allocation and Crane Operations Planning in Seaport Container Terminals. Transportation Science, 47(2):131–147.

UNCTAD (2018). Review of maritime transport 2018. New York: U. Nations.

Unsal, O. and Oguz, C. (2013). Constraint programming approach to quay crane scheduling problem. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 59:108–122.

13th *International Conference on Modeling, Optimization and Simuation* - MOSIM*'20 - November 12-14, 2020*
Agadir - Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

Case study of supply chain in textile industry: a dynamic product allocation decision problem

A. BERTHIER, H. CHEHADE, A. YALAOUI, L. AMODEO, F. YALAOUI **C. BOUILLOT**

Laboratory of Industrial Systems Optimization (LOSI)
University of Technology of Troyes
12 rue Marie Curie, CS42060, 10004 Troyes Cedex, France
alice.berthier@utt.fr

ABSTRACT: *This paper tackles a supply chain strategic dynamic decision problem in textile industry. The supply chain studied is composed of several production locations on the three process stages. Different suppliers provide raw materials on production location of the first stage. Products can be grouped into 16 different categories. Supply chain costs are mainly due to transportation costs. The objective of this study is to determine where fabrics must be produced to satisfy the assembly demand at different locations. This problem has never been studied in textile industry application context. A mathematical model based on graph representation is proposed.*

KEYWORDS: *Supply chain, production allocation, optimization, mathematical model*

1 INTRODUCTION

In any industry, the supply chain is one of the most important part of organization. The supply chain decisions have a great influence on the rest of the system. The related costs are not negligible and are composed by inventory, production, and transportation costs. Depending on strategic decisions, the time to market can vary, or the service level can be significantly impacted. The Industry 4.0 revolution is accelerating the pace of supply chain transformations. This increases the necessity of agility and flexibility which can adapt to the constant changes in the market. Transportation must be reduced to the minimum to save time and money depending on the production and inventory locations. This is also motivated by a desire and need to move towards a more sustainable and ecological supply chain.

The case study in this paper is inspired from an industrial real case in textile industry. There are three main production stages (Figure 1):

- The first one is the creation of a knitting roll from the cotton yarn.
- The second step provides color properties and resistance to the fabric.
- The final one is the garment making. The knitting roll is cut into different pieces and these pieces are assembled.



Figure 1 – The three fabrication stages in textile industry

The first stage of this textile process was analyzed in Berthier et al. (2019). The authors focused on a dynamic layout of the workshop. The main subject is about the creation of groups of machines to balance the workload between all the operators and to propose a new implementation method of the machines. Nevertheless, the scope of the work of Berthier et al. (2019) was only at the tactical level and one component of the supply chain. Strategic work on the whole supply chain can conduct to better results if optimization is also conducted across the whole elements of the supply chain.

For each stage, several production locations can be used, each with different production costs. Currently, in the industrial case considered, two different locations for knitting and dyeing operations are available and four different locations for assembling operation. Transport is therefore necessary if the product changes from a location to an other between two production stages. The impact will be felt at stor-

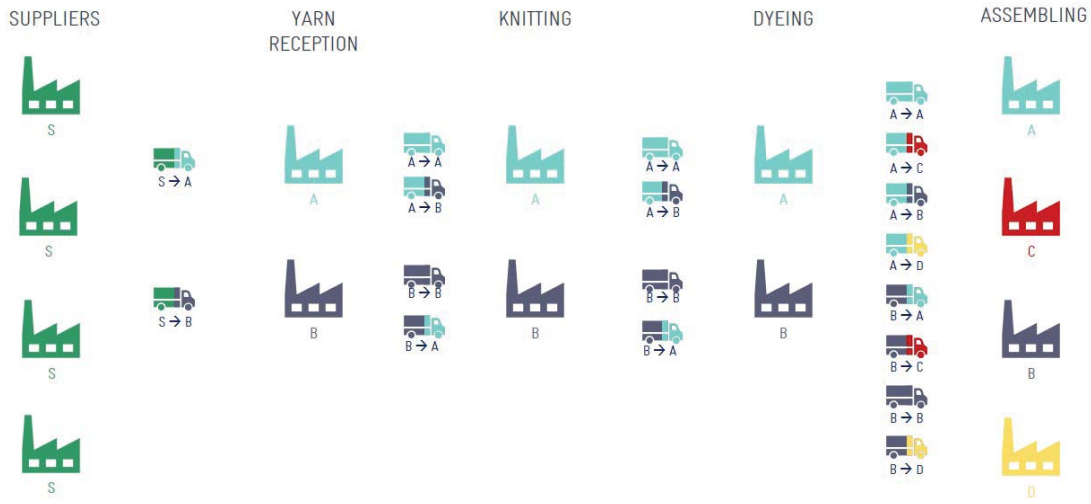


Figure 2 – The supply chain flow representation of the industrial case

age locations. Raw materials arrive from four different suppliers with different prices and costs.The costs vary depending on the location where the goods are delivered, due to different supplier transportation costs. Figure 2 shows the supply chain with the different possible locations of each stage from the suppliers to the assembling factories. Each letter represents a location. Location A and B can perform all three stages of production (knitting, dyeing and assembling) whereas location C and D may only carry out assembly operations. Each production location (A and B) is subject to production capacity $capa_{ij}$.

On the case study analyzed in this paper, the large diversity of products are grouped into four families. At each stage of the process excepting for the assembling, the available locations are qualified to make all the products. The dyeing operation has a production cost that varies according to the product family. Meanwhile, the costs do not present a large variation in the knitting operation. Therefore, the families are classified depending only on the dyeing operation:

- Bleaching: an unbleached fabric is transformed into a white fabric.
- Printing: a plain fabric is printed with a pattern using a printing process.
- Washing: the fabric is knitted directly with dyed yarns. The dyeing process only consists of a washing cycle.
- Dyeing: an unbleached fabric is transformed into a plain fabric. The darker the colour, the longer and more complex the process.

On each assembling location, the proportion of each family is known in advance and is determined by the production process. Table 1 presents the distribution of families of product on the different assembling locations. Each location makes a specific type of product. For instance, location C is specialized on underwear whereas location D is specialized on adult clothing. This two categories can use similar product families (fabrics) but do not use the same manufacturing processes to obtained different finished products.

	A	B	C	D
Bleaching	3%	13%	15%	70%
Printing	1%	24%	25%	50%
Washing	3%	28%	27%	42%
Dyeing	1%	22%	25%	52%

Table 1 – Finished product per location distribution for each product families

Each product family are divided into four, one for each assembly locations. So finally, we have 16 product categories as products are grouped by product family and assembling location. The assembling location d_k is the last assignment location for product category k.

This paper seeks to answer the question of where to produce fabrics at each stage of the manufacturing process to supply finished product assembly locations with the lowest possible costs on the whole chain. This represents a strategic choice assignment which is performed every six months. A dynamic decision model would be very useful for the company. Nowadays, a whole team is dedicated to decide where each product is manufactured at each stage. They only have standard calculation tools without any decision support. The study of this paper searches to provide them a dynamic decision support tool. The problem decision is to determine the quantity x_{kij} of product

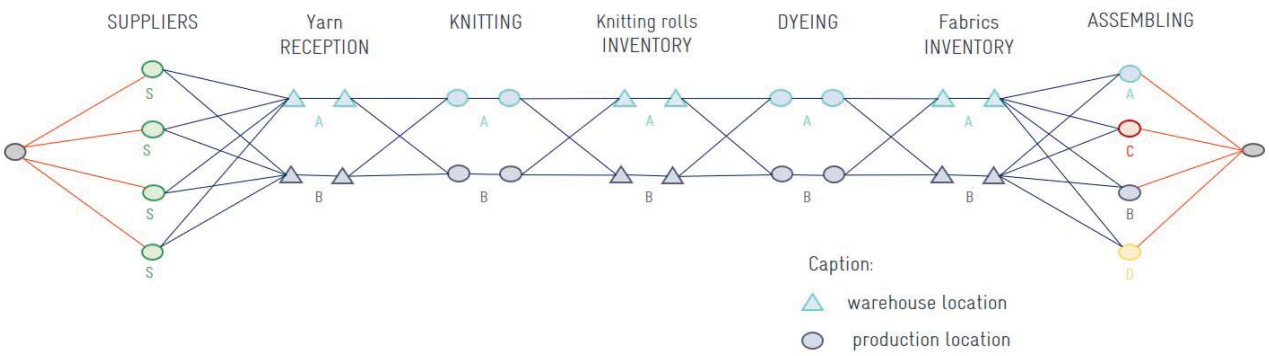


Figure 3 – The supply chain graph representation

category k assigned between nodes i and j.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 gives a literature review of similar problems. Section 3 presents the resolution method and the mathematical model proposed using graph theory. Section 4 provides preliminary results of the model on a real case instance. A conclusion and future research directions end up the paper in section 5.

2 STATE OF THE ART

In this section, a review of supply chain related problem and production allocation is conducted.

Supply chain is a set which includes all the related activities with commodities stream from raw materials to final product (Parsanejad and Nayebi (2020)). By the stream side, there are two other streams known as information stream as well as financial and credit resources stream (Giannoccaro and Pontrandolfo (2002)). The supply chain management is a collection of some methods that is used to integrate effectively the suppliers, producers, warehouses and stores. The supply chain includes all the direct and indirect steps which are involved in the completion of the customers orders. The supply chain is not just related to manufacturers and suppliers but it is also applicable to transportation, warehouses, retailers and even the customers.

In today's rapidly changing economic and political conditions, operations managers and planners need to address accurately questions such as which plants to operated on which product mix per plant (Tsiakis and Papageorgiou (2008)). There are several papers related to the production allocation and distribution. Mixed integer programming models have been developed to allocate customer order to forest product company with various plants located in different countries to reduce production and transportation costs (Aydinel et al. (2008)). The necessity to develop strategic and tactical planning models in the supply chain have been recognized by the industry. Particularly, by using quantitative approaches rather than the qualitative ones (Shapiro (2004)). This has created many challenges both for researchers and practitioners who wish to successfully implement supply chain support systems.

Previous attempts to improve the performance of supply chain networks have mainly focused on the logistic aspects rather that the business decisions associated. In an early attempt Arntzen et al. (1995) developed a mixed integer linear programming "global supply chain model" aiming to determine: the number and location of distribution centres, customer-distribution centre assignment, number of echelons and the product-plant assignment. The objective of the model is to minimise a weighted combination of total cost and activity days as a bill of material problem.

Guinet (2001) has examined the economics of multi-site production systems using a two-level approach to allocate production to sites and address the workshop scheduling problem. Kaihara (2003) has used an agent based approach to manage supply chains in terms of product allocation and resource distribution. Panicker et al. (2013) has solved a fixed charge transportation problem. Each route is associated with a fixed charge (or a fixed cost) and a transportation cost per unit transported. This author has used an algorithm based on ant colony optimisation to solve the distribution-allocation problem in a two-stage supply chain. The first problem instance used by this author is used in this paper to validate the proposed model.

For a more detailed state of the art on supply chain allocation problem, readers may refer to the recent review made by Di Pasquale et al. (2020). The authors have conducted a systematic literature review specifically regarding order allocation methods. The research aimed to evaluate how often and when the issue has been defined with an individual focus, independently of the supplier selection problem.

To the best of our knowledge, no previous papers have handled a supply chain management problem in the particular case of textile industry with production possible in different locations. This is an assignment problem of product on production locations.

3 RESOLUTION METHOD

In order to solve this problem, the supply chain flow is represented as a graph. A mathematical model based on this representation allows to solve this specific problem arising from the industry. Figure 2 can be translated into a graph as it is shown in figure 3. On this representation 30 nodes are necessary. On each arc, a cost value c_{kij} is assigned and a decision variable x_{kij} can be associated for each product category k between nodes i and j. To solve the most generic problem with a fixed cost f_{ij}, a binary decision variable b_{ij} is used too.

The quantity assigned to arcs of the first part of the graph (from the first node) are known (supplier procurement). The quantities purchased to each supplier are known beforehand. Similarly, the arcs of the last part (to the last node) are also pre-determined (figure 1). The proportion of each product category on each assembling locations are known on this study. They are considered as customers of the supply chain. On all the other arcs, a decision variable x_{kij} is available to determine the optimal quantity of category k between locations i and j. As it is explained in Introduction section, the number of product category is 16 according to the distribution of the products by family and assembly locations.

3.1 Notations

$\mathcal{N}$: Set of nodes
$N \in \mathbb{N}$: Number of graph nodes
$i, j = 1...N$: Nodes indexes
$\mathcal{K}$: Set of category products
$K \in \mathbb{N}$: Number of category products
$k = 1...K$: Products indexes
$c_{kij} \in \mathbb{R}$: Cost per unit of product k ($k \in \mathcal{K}$) between nodes i and j ($i, j \in \mathcal{N}$)
$f_{ij} \in \mathbb{R}$: Fixed cost between nodes i and j ($i, j \in \mathcal{N}$)
$d_k \in \mathbb{N}$: Last assignment node of product k ($k \in \mathcal{K}$) (location of assembly operation)
$q_k \in \mathbb{N}$: Quantity of product k ($k \in \mathcal{K}$)
$capa_{ij} \in \mathbb{N}$: Maximum capacity between nodes i and j ($i, j \in \mathcal{N}$)

3.2 Decision variable

$x_{kij} \in \mathbb{N}$: Quantity of product category k ($k \in \mathcal{K}$) assigned between nodes i and j ($i, j \in \mathcal{N}$)
$b_{ij} \in \{0, 1\}$: equal to 1 if quantities are assigned on the arc i,j ($i, j \in \mathcal{N}$), 0 otherwise

The decision variables determine over every arc the quantity to transit for each category of products. This ensures the full representation of product movement across the distinct stages considering the constraints in section 3.4.

3.3 Objective function

$$Minimize \sum_{k\in\mathcal{K}} \sum_{i\in\mathcal{N}} \sum_{j\in\mathcal{N}, i\neq j} x_{kij} c_{kij} + \sum_{i\in\mathcal{N}} \sum_{j\in\mathcal{N}, i\neq j} b_{ij} f_{ij} \quad (1)$$

The objective function (1) minimizes the supply chain total cost. The cost c_{ijk} takes the production, transportation and inventory cost per unit.

3.4 Constraints

$$\sum_{j\in\mathcal{N}} x_{k1j} = q_k, \forall k \in \mathcal{K} \quad (2)$$

$$\sum_{j\in\mathcal{N}} x_{kNj} = 0, \forall k \in \mathcal{K} \quad (3)$$

$$\sum_{i\in\mathcal{N}} x_{ki1} = 0, \forall k \in \mathcal{K} \quad (4)$$

$$\sum_{j\in\mathcal{N}} x_{kij} = \sum_{j\in\mathcal{N}} x_{kji}, \forall k \in \mathcal{K}, i = 2...N-1 \quad (5)$$

$$\sum_{i\in\mathcal{N}} x_{kij} \leq q_k, \forall k \in \mathcal{K} \quad (6)$$

$$x_{kd_kN} = q_k, \forall k \in \mathcal{K} \quad (7)$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}} x_{kij} \leq capa_{ij}, \forall i, j \in \mathcal{N} \quad (8)$$

$$\sum_{k\in\mathcal{K}} x_{kij} \leq \sum_{k\in\mathcal{K}} q_k * b_{ij}, \forall i, j \in \mathcal{N} \quad (9)$$

Constraint (2) initializes the first node with the total quantity of each product k. Constraint (3) ends the flow at node N. Constraint (4) starts the flow at the first node. Constraint (5) ensures the flow conservation between the input and output of each node. Constraint (6) guarantees that there is no return flow. Constraint (7) ensures that the product flow ends at the node d_k provided in data for the last production step. The constraint (8) ensures that capacity is respected between the different nodes. The final constraint (9) determines the value of b_{ij} on each arc.

4 PRELIMINARY RESULTS

In a first time, the model has been tested on the first problem instance from Panicker et al. (2013). The instance is a two stages supply chain composed of 9

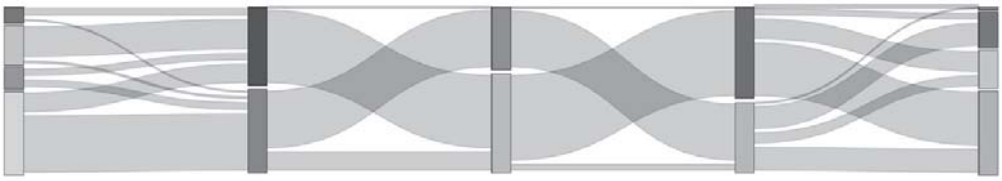


Figure 4 – Initial supply chain proportion between the different locations

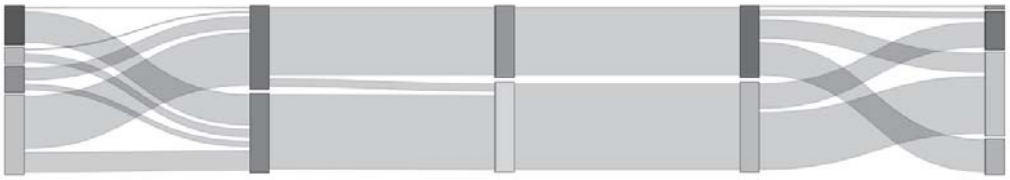


Figure 5 – Final supply chain proportion between the different locations

nodes. In this instance, the three retailers are considered as assembly location operation. This generate three category of product for the problem considered in this study and the corresponding retailer node of each category determined the data d_k. The quantity of each product is the demand of each retailers.
The model proposed in this study is different from the model proposed by Panicker et al. (2013) as decision variable are not decomposed by stages to be more generic. On this instance, the same objective function value, 112 600 is reached with the same product assignement per location.

In a second time, the model has been tested on real data set. This one does not consider the fixed cost. This part is deleted from the objective function and the variable b_{ij} is not useful in this case as well as the constraint 9. In the industrial data, there are 16 category products:

- 4 flow families: bleaching, printing, washing and dyeing
- 4 assembling locations

Two hypothesis have been made. The volumes of fabrics consumed by manufacturing locations remain the same. Material losses are not considered including between knitting and dyeing operations. The volumes of yarn supplied by each supplier are known per category of products.

For confidentiality reasons, results will not be detailed precisely. The mathematical model has been solved using the CPLEX-ILOG solver with an Intel Core i5 processor.

The total cost has been reduced by 3% on the entire supply chain. But the transportation cost was reduced by **37%** which is the most significant reduction on this study. The total cost does not decrease significantly because production level has to be maintained on the different locations. So the production cost is relatively identical. The main improvement is the streamlining of travel. Right from the start of the process, products are manufactured as close as possible to their assembly location. The evolution is shown by comparing figure 4 and figure 5. On these figures, larger lines represent bigger associated quantities. The first figure shows the proportion of production on each location with the transportation flows generated, before the implementation of the model. The second figure shows the same data when the MILP model is used to determine the flows. Clearly, the presence of cross-flows is less important in the second figure. The transportation costs are thus reduced.

		A	B	C	D
Bleaching	A	87%	263%	340%	29%
	B	-100%	-57%	-59%	-100%
Printing	A	39%	-78%	-77%	34%
	B	-100%	65%	58%	-100%
Washing	A	6%	83%	50%	51%
	B	-100%	-37%	-30%	-100%
Dyeing	A	17%	-100%	-100%	18%
	B	-54%	74%	45%	-55%
Total	**A**	**27%**	**-35%**	**-15%**	**33%**
	B	**-90%**	**21%**	**7%**	**-88%**

Table 2 – Transportation flow from dyeing to assembling stage difference between the initial supply chain and the MILP model flows proposition per product families

The final transportation is the most expensive. To go from location B to location D, products have to pass through A. Table 2 shows the comparison be-

tween initial transportation flow and flow determined by the the MILP model between dyeing and assembling stages. The flows between locations B and D are reduced by 88% in preference (+33%) to transportation between locations A end D closer.

These results can be used by the company as a dynamic decision tool to manage the affectation process of new product made at every collection launch. This represents a strategic choice assignment which is performed every six months, and can lead to keep the total supply chain costs as low as possible under the current configuration.

5 CONCLUSION

In this paper, a real case of textile industry problem has been studied. A production allocation problem in supply chain context is a very strategic decision problem for any company. The problem is explained in this paper. The production process is composed of three different operations and for each stage, multi-factories are available in different locations. The decision consists on determining which quantity of each product category will be manufactured at each location. The pursued of objective is to minimize the supply chain costs. The latter are composed by inventory, production and transportation costs.

Preliminary results are presented. The model proposed is first tested on an instance from Panicker et al. (2013). The same objective value and product assignment are found. In a second time, the model is used to solve the problem from an industrial company. However, due to confidential obligation, details can not be provided. Despite this, an important reduction on the transportation costs can be achieved by using the proposed mathematical model. The improvement in the transportation costs is of 37% when compared to the current product allocation. This study offers to the company a new dynamic decision support tool that can help them to take supply chain strategic product allocation decisions every six months (at every collection launch).

For future research, a profit model should be considerate. In this way, a variable selling price can be proposed depending on the production channel used. For instance, products 100% Made In France can be sold at a higher price. On the other hand, the number of sales and therefore of production can also vary according to the places of production of the different stages. The Made In France can be more attractive to customers.

Acknowledgment

This research was supported by ANRT (Association National Recherche Technologie). These acknowledgements also go to our industrial partner. Their participation allows us to work on research topics applied to the current industrial context.

References

Arntzen, B. C., Brown, G. G., Harrison, T. P., and Trafton, L. L. (1995). Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces*, 25(1):69–93.

Aydinel, M., Sowlati, T., Cerda, X., Cope, E., and Gerschman, M. (2008). Optimization of production allocation and transportation of customer orders for a leading forest products company. *Mathematical and Computer Modelling*, 48(7-8):1158–1169.

Berthier, A., Yalaoui, A., Chehade, H., Yalaoui, F., Amodeo, L., and Coquelet, G. (2019). Machines group and load balancing: an industrial case. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13):415–420.

Di Pasquale, V., Nenni, M. E., and Riemma, S. (2020). Order allocation in purchasing management: a review of state-of-the-art studies from a supply chain perspective. *International Journal of Production Research*, pages 1–26.

Giannoccaro, I. and Pontrandolfo, P. (2002). Inventory management in supply chains: a reinforcement learning approach. *International Journal of Production Economics*, 78(2):153–161.

Guinet, A. (2001). Multi-site planning: A transshipment problem. *International Journal of production economics*, 74(1-3):21–32.

Kaihara, T. (2003). Multi-agent based supply chain modelling with dynamic environment. *International Journal of Production Economics*, 85(2):263–269.

Panicker, V. V., Vanga, R., and Sridharan, R. (2013). Ant colony optimisation algorithm for distribution-allocation problem in a two-stage supply chain with a fixed transportation charge. *International journal of production research*, 51(3):698–717.

Parsanejad, A. and Nayebi, M. A. (2020). An applied intelligent fuzzy assignment approach for supply chain facilities. *Journal of Applied Intelligent Systems and Information Sciences*, 1(1):50–59.

Shapiro, J. F. (2004). Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6-7):855–861.

Tsiakis, P. and Papageorgiou, L. G. (2008). Optimal production allocation and distribution supply chain networks. *International Journal of Production Economics*, 111(2):468–483.

DEMAND DRIVEN MRP: LITERATURE REVIEW AND RESEARCH ISSUES

M. EL MARZOUGUI[1], N. MESSAOUDI[1]
[1] Laboratory of industrial engineering, Information processing and logistics
Faculty of Sciences Ain Chock
Hassan 2 University, Casablanca, Morocco
mustapha.elmarzougui@gmail.com, najatm2013@gmail.com

W. DACHRY[2], H.SARIR[3], B. BENSASSI[1]
[2]Laboratory of engineering, industrial management and innovation Hassan 1 University, Settat, Morocco
[3]National School of Applied Sciences, Tétouan, Morocco
wafaa.dachry@uhp.ac.ma, hsarrir@uae.ac.ma
bahloul_bensassi@yahoo.fr

ABSTRACT: *The Demand-Driven Material Requirements Planning (DDMRP) is a recent approach focusing on planning, production and inventory management that is invented to manage uncertainties demand in the VUCA environment. Nevertheless, there is a lack of literature review in this field and only a few studies have scientifically proven the performance of DDMRP but not much has been academically validated yet.*
In this paper, we survey the state-of-the-art research of DDMRP. A literature review is used to identify DDMRP contributions that discuss in recent methods and focuse on production planning and flow distribution.
The final goal of our work research is to objectivize the reality of the DDMRP benefits, to discuss the contradictions and inconsistencies found in the literature, and to propose new opportunities and challenges that should be addressed by future research.

KEYWORDS: *Demand Driven MRP, Supply Chains, Operations Management, Production Management.*

1 INTRODUCTION

Efficient Operations and Supply Chain Management are important part of most businesses and applying the right strategy is essential for managers in competitive industries and markets. Different planning, management, and supply chain control systems are widely used in practice. However, these systems are difficult to optimize, especially in a VUCA "Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity" environment (Bennett, N. and G. James Lemoine, 2014).
In this context, this paper presents a preliminary analysis of the traditional methods of planning and execution of the production MRP (Material Requirement Planning), and Demand Driven MRP. So, this analysis will enrich the research environment and encourage Moroccan Industries to implement new methods in their manufacturing process.

This study was motivated by the opportunities that the DDMRP approach was not exploited to its full potential by researchers. Therefore, the main contributio of this paper is to provide a comprehensive literature review of DDMRP during the last 10 years, which shows a significant increase in research work published in this field. Also, this new classification aims to enhance our ability to discover important knowledge in this literature, to identify any new trends in this field, and to highlight any gaps that would benefit from future research efforts.

This work was mainly based on the book "Demand Driven Material Requirement Planning" by Carol Ptak and Chad Smith, inventors of this method, to develop this literature review (Ptak, C. and C. Smith, 2018).
The paper is organized as follows: In Section 2, we present the « Research methodology » used in this topic. Then in Section 3, we show the « Literature review » of the main Manufacturing Planning and Control (MPC) System in operations management. Section 4 « Critical Analysis and Discussion » presents an analysis and discussion about the most prevalent DDMRP aspects. Finally, the conclusion will be drawn in section 5.

2 RESEARCH METHODOLOGY

The literature review is a usual method to investigate thoroughly different approaches to the research subject. Literature review usually aims to identify and evaluate the current state of the art of research on the field and then, to classify the relevant articles so as to identify possible gaps, issues, and opportunities for further research. To do this, this work aims to explain the similarities and differences between conventional methods such as MRP and the new DDMRP approach. This work highlighted the lack of studies in the literature review on this approach. Starting from this lack of knowledge, we conducted a literature review to collect and critically analyze all relevant research in the field of DDMRP and provide directions for a possible model.

The results of this discussion will generate new knowledge in the field of industrial engineering, operations, and supply chain management.
The process of analysis contains the main steps: defining unit of analysis, period of analysis, classification context, material evaluation and collecting publications, and delimiting the field. Following this process guarantees a structured and effective literature review. A summary of the method used is shown in Table 1, it was inspired by the method used by (Cherrafi, A. et al., 2016) in their literature review.
To capture evolution, two variables were selected:

First, number of articles published about a DDMRP's: we considered only papers that contribute clearly to the development of a DDMRP by a conceptual, simulations, empirical study or comparison with other systems. Therefore, papers that only cite the system were not considered in the evolution analysis.
Second, type of paper published: we classified the papers published about each system into axiomatic or empirical, following the classification of operations management papers proposed by (Bertrand, J. W. M., and J. C.Fransoo, 2002). This variable was important to further analyze how close are literature and practice regarding the new systems identified.

Unit of analysis	Relevant books, articles and theses published on the links among DDMRP and MRP from both professional and scholarly publishers. Unpublished working papers, non-English papers, and Demand Driven Institute articles / presentations were excluded.
Type of analysis	Quantitative and Qualitative documents were considered for this research.
Period of Publication	Period of analysis was from 2011 (the year of the publication of the first book) to 2019
Search engines used to search relevant publications	The databases chosen for the research were : Elsevier, Emerald, Springer, Taylor & Francis, and the Google Scholar database, or library services (e.g.Wiley online library, Ebsco, Scopus, Metapress, Subito)
Keywords to carry out the literature review	For the search criteria, the authors used a combination of the following terms: 1. DDMRP 2 .Demand Driven MRP , Demand Driven Material Requirement Planning 3. DDMRP Approach, DDMRP Process, DDMRP Method 4. Literature Review
Main journals in operations management	International Journal of Production Research, International Journal of Operations & Production Management, Journal of Industrial Engineering and Management, International Journal of Production Economics
Select the exclusion and inclusion criteria to focus on relevant papers	The criteria used to select and evaluate the articles included: (1) exclusive focus on the DDMRP methodology, (2) inclusion of no other methodology, (3) publication in an academic journal or conference, (4) not being written for a terminal degree or master's degree, (5) the chosen articles included some case studies, both simulated and real. Taking the stated delimitations into account, a total of 23 relevant papers/ books were selected

Table 1: Summary of research protocol

Descriptive analysis
Figure 1 presents, an analysis of the distribution of publications per year across the period studied, to show the quantitative trend of research topics evolved over time. Figure 1 presents the year wise distribution of all 23 papers from 2011 to 2019. Although the star ting point was appeared in 2011 as part of the research effort conducted by Ptak, C. and C. Smith. This year is the year of the publication of the first book of these authors. It can be deduced that the DDMRP topic has received and continues to receive greater attention from researchers.

With regard to the present time, it can be seen that there has been a significant growth in the interest shown in the DDMRP topic since 2018.The graphical representation indicates the increasing number of research articles published over the two lasts years of the period: 52% of the articles were published between 2018 and 2019. The year 2019 has the highest number (7) of published articles and the year 2018 has the second highest (6). Therefore, we can deduce that it is a domain of recent research, which may explain the lack of abundance of studies covering the discipline.

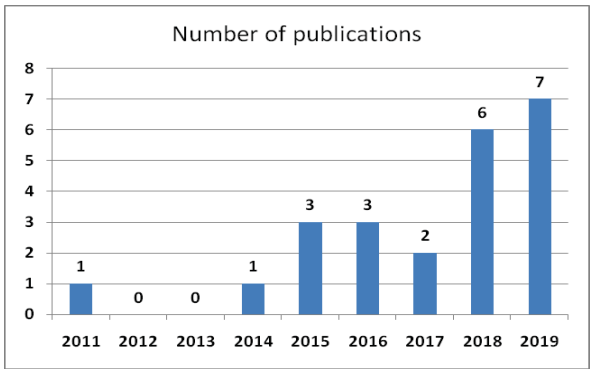


Figure1. Distribution of publications per year across the period studied.

3 LITERATURE REVIEWS OF MAIN MPC SYSTEMS

3.1 Material Requirements Planning: MRP

Material Requirements Planning (MRP) was the most widespread MPC system in the word as a push system. It has evolved into MRP II (Manufacturing Ressource Planning) and ERP (Enterprise Ressource Planning).
It properly determines the components as well as the parts needed to satisfy the requirements of a product. APICS (2016: PP.110) define MRP as « a set of techniques that uses Bill Of Materials (BOM) data, inventory data, and the Master Production Schedule (MPS) to calculate requirements for materials. It makes recommendations to release replenishment orders for material.
However, many authors have analyzed MRP and identified some issues about this method. According to (Ihme, M. and R.Stratton, 2015), the MRP method had several problems, inaccuracy of the forecast/MPS, full BOM runs, manufacturing order release, limited early-warning functionality, lead-time ambiguity, unresponsive demand determination and lacking priority consideration. Likewise, Kortabarria (2018) have analyzed MRP and have concluded that it is not the best MPC system to deal with a volatile and variable world. Finally, MRP was designed for a typical 1970s manufacturing company: it has not changed since (Acosta, A.P.V. et al., 2019). Therefore, traditional MRP is not a suitable system in the agile environment.

3.2 Evolution of Supply Chain conditions:

The general market behavior has evolved in the last 20 years: more demand instabilities, more sensibility to crisis and economic events, more product diversity, increasing competition, reduced customer lead times and reduced time to market, etc (Miclo, M. 2015). These different parameters result in creating more variability in the MRPII production system and difficulties to establish accurate forecasts. Moreover, Material Requirement Planning is known to react nervously to demand changes being a source of the bullwhip effect (Ptak, C. and C. Smith, 2018) and causes a Bi-Modal stock level. Therefore, MRP remains reliable in the absence of demand variables and peaks. MRP has limits with new market constraints. It is in this context that a new innovative approach appeared: the DDMRP.

3.2.1 Variability:

The four mains DDMRP variability sources are identified by (Ptak, C, and C. Smith, 2011) as supply variability, demand variability, operational variability and operation time variations, and quality issues management variability shown on figure 2. These latter generate bullwhip effect and bi-modale distribution of inventory in the supply chain system.

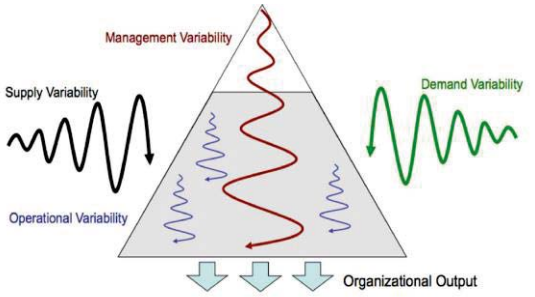


Figure 2: Main variability sources (Miclo, R., 2016)

3.2.2 Bullwhip effect:

The bullwhip effect is the phenomenon of variability magnification as the view moves from the customer to the producer in the supply chain. For example, where orders to the supplier tend to have larger variance than sales to the buyer (i.e., demand distortion), and the distortion propagates upstream in an amplified form (i.e., variance amplification). The effect indicates a lack of synchronization among supply chain members.

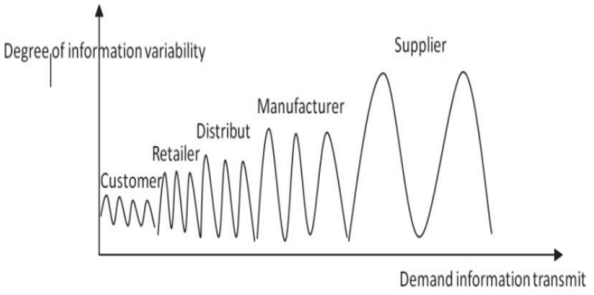


Figure 3: Schematic diagram of bullwhip effect (Jianhua, D., 2017)

3.2.3 Typical Bi-Modal Distribution of inventory:

Using a traditional MPC system, the stock level of a company presents a Bi-Modal distribution that switches between too much and too little stock resulting in high cost and a low level of service (Figure 4) (Ptak, C. and C. Smith, 2018).

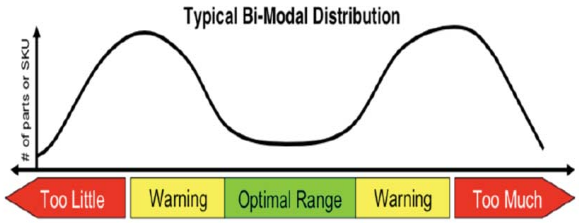


Figure 4: Typical Bi-Modal Distribution
(Ptak & Smith, 2018)

3 .3 Demand Driven MRP:

Given the current VUCA highly volatile and variable manufacturing environment where planning scenarios are more complex than ever, a demand-driven manufacturing strategy is required. This strategy aims to compress the deadline and align efforts with market demands. This includes careful planning, planning and execution synchronization with material consumption. Such a strategy encourages companies to centralize demand instead of storing. Thus, they can detect and adapt to market changes, to become more agile (Ptak, C. and C. Smith, 2011).

Taking into account this dilemma and the need for an MPC responding to a demand-driven manufacturing strategy, the DDMRP methodology was developed. DDMRP is the engine that generates and manages the supply orders for a demand-driven operating model (Ptak, C. and C. Smith, 2018).

DDMRP was created by Carol Ptak and Chad Smith at the start of the 21st century and was featured in the 3rd edition of Orlicky's Material Requirements Planning in 2011 (Ptak, C. and C. Smith, 2011) and the book DDMRP Demand Driven Material Requirements Planning (Ptak, C. and C. Smith, 2018).

To face the current market problems, DDMRP brings together the advantages of well-known concepts drawn from MRP (Material Requirements Planning), DRP (Distribution Requirements Planning), Lean, Six Sigma and TOC (Theory Of Constraints) with some specific innovations (Figure 5).

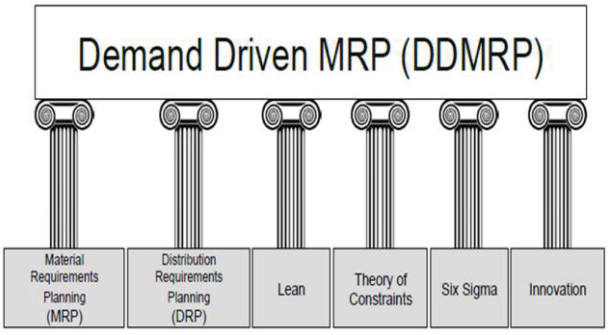


Figure 5: The six DDMRP pillars
(Ptak & Smith, 2018)

DDMRP can be applied in three key areas: purchase (critical/long-term purchase), production (critical item manufactured, sub-assemblies, finished product, and some critical items not stored), and distribution (finished product stocks).The DDMRP is composed of five phases (Figure 6). The first three phases define the initial and evolutionary modeling of the DDMRP model. The fourth and fifth phases define the operational aspects of the DDMRP system, which are planning and execution.

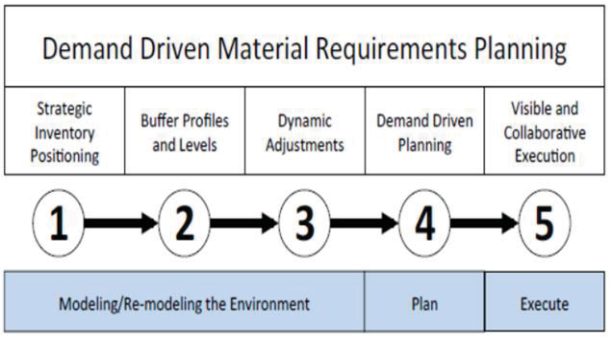


Figure 6: the 3 steps and 5 components to implement DDMRP (Ptak & Smith, 2018)

The following table 2 explains their characteristics (Ihme, M., 2015).

Component	Characteristics
Strategic Inventory Positioning	Ptak and Smith (2008) found that the question of how much inventory one should hold needs to change to asking where inventory should be positioned. It is necessary to protect the supply chain from fluctuating customer demand and supply variability. Inventory of raw and intermediate items can also help to compress cumulative lead-times and improve overall stability.
Buffer Profiles and Levels	Buffers are calculated for manufactured, purchased and distributed items. The calculation is based on the average daily usage (ADU), variability and lead-time. Furthermore, minimum order quantities are considered if needed. Ptak and Smith (2011) define three distinct buffer zones (green, yellow and red).Green stands for nothing to do; yellow indicates the rebuild or replenishment zone and red means special attention required.
Dynamic Adjustments	DDMRP considers recalculated adjustments, planned adjustments and manual adjustments within the model triggered by external events changing ADUs.
Demand Driven Planning	DDMRP separates parts into five distinct categories (replenished, replenished override, min-max, non-buffered and lead-time managed) and parts are allocated to one of the five categories according to their needs.
Visible and Collaborative Execution	DDMRP contains a sophisticated alerting system that circumvents the priority by due-date issue of classic MRP by establishing alerts based on buffer states while still considering due dates as a second source of information. Alerts are created based on the buffer state of the part in focus. Collaboration is needed to establish clear rules for decision-making based on these buffer states.

Table 2: five components of DDMRP

4 CRITICAL ANALYSIS AND DISCUSSION

Since the publication of this method, the research work done on the subject has been quite small. This section presents the review of 23 scholarly articles during 2011-2019. We identify titles, authors, years, research methodologies, and the research contributions as shown in Table 3 to draw conclusions and identify some gaps and lines of research.

Table 3 presents the different research methodologies used by various researchers are divided into four types: conceptual, empirical, comparative, and exploratory (Dangayach, G.S. and S. G. Deshmukh, 2001).

N°	Title	Author(s)	Year	Methodology	Contribution to research
1	Orlicky's Material Requirements Planning	Ptak, C. and C. Smith	2011	Conceptual	The authors explain the DDMRP as an innovative multi-echelon pull methodology to plan and control inventories and materials
2	Strategic Inventory Positioning for MTO Manufacturing Using ASR Lead Time	Rim, S et al.	2014	Conceptual	Development of a Genetic Algorithm to optimize strategic inventory position for MTO manufacturing using ASR Lead Time
3	MRP vs. Demand-Driven MRP: Towards an Objective Comparison	Miclo, R et al.	2015	Comparative	A Case study was adopted to compare MRP and DDMRP using a Discrete-Event Simulation (DES) approach
4	Interpreting and applying Demand Driven MRP : A case study	Ihme, M.	2015	Empirical Study	Comparison between MRP and DDMRP using a simulation on a case study
5	Evaluating Demand Driven MRP: a case based simulated study	Ihme, M. and R. Stratton	2015	Empirical Study	A case analysis was used to determine the underlying reasons for the current performance and a simulation study designed to compare the impact of adopting DDMRP and MRP
6	Strategic Inventory Positioning in BOM with Multiple Parents Using ASR Lead Time	Jiang, J and S. Rim	2016	Conceptual	Development of a Genetic Algorithm to optimize strategic inventory position in BOM with multiple parents using ASR Lead Time
7	An empirical study of Demand-Driven MRP	Miclo, R. et al.	2016	Empirical Study	A Discrete-Event Simulation approach used to conduct an objective and quantitative comparison between DDMRP and MRP
8	Challenging the "Demand Driven MRP" Promises : a Discrete Event Simulation Approach	Miclo, R	2016	Empirical Study Comparative	Quantitative study challenging the promises of DDMRP following several simulations on two case studies
9	Effective production control in an automotive industry: MRP vs. demand-driven MRP	Shofa, M. J and W. O. Widyarto	2017	Comparative	Evaluation was conducted through a simulation using data from an automotive company in Indonesia
10	Strategic WIP Inventory Positioning for Make-to-Order Production with Stochastic Processing Times	Jiang, J and S. Rim	2017	Conceptual	Development of a Genetic Algorithm to optimize strategic inventory position make-to-order production with stochastic processing times
11	Effective production planning for purchased part under long lead time and uncertain demand: MRP Vs demand-driven MRP	Shofa, M. J et al.	2018	Comparative	The evaluation of MRP and DDMRP was conducted through a Discrete Event Simulation with the long lead time and uncertain demand scenarios
12	An empirical comparison study between DDMRP and MRP in Material Management	Favaretto, D and A. Marin	2018	Comparative	The fundamental characteristics of the DDMRP reviewed and the methodology of implementation presented
13	Modélisation UML des processus de planification MRP II et DDMRP : Analyse critique.	Laraje, N and S. L. Elhaq	2018	Conceptual	Development of the two methods MRPII and DDMRP using of a simulation model which is based on the UML language
14	Vers une cartographie de processus explicite pour le modèle Demand Driven Adaptive Enterprise	Martin, G et al.	2018	Conceptual	Development of a process model mapping model applied to the Demand Driven Adaptive Enterprise methodology
15	Material Management without Forecasting: From MRP to Demand Driven MRP	Kortabarria, A. et al.	2018	Empirical study	Analysis of the implemented changes of a case study and the subsequent qualitative and quantitative results of a company after converting from MRP to DDMRP.
16	Enjeux financiers de DDMRP : Une approche simulatoire.	Bayard, S., and F. Grimaud	2018	Empirical Study	Analysis of the impact of DDMRP on the Working Capital Requirement using discrete event simulation
17	Inventory Management using Demand Driven Material Requirement Planning for Analysis Food Industry	Mukhlis, D. H. F et al.	2019	Comparative	Development of the DDMRP methodology and comparing before and after of the sauce industry material.
18	Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management	Miclo, R et al.	2019	Comparative	Presented a comparative between DDMRP, Kanban/Lean and MRP II and evaluated it in a test environment

19	A Mathematical Safety Stock Model for DDMRP Inventory Replenishment	Lee, C. and S. Rim	2019	Conceptual	Development of a new mathematical formula for calculating safety stock and make a simulation to compare the new safety stock with the traditional method and the DDMRP method
20	Demand Driven Material Requirements Planning : some methodical and practical comments	Pekarciková, M et al.	2019	Empirical Study	Extend the knowledge base in the area of demand driven supply logistics in the context of Industry 4.0 and verify the processed theoretical knowledge in a case study
21	Compréhension du DDMRP et de son adoption : premiers éléments empiriques	Bahu, B. et al.	2019	Exploratory	Presents the practical functioning of the DDMRP method and to propose proposals concerning the reasons which seem to push companies to be interested in it
22	Decoupled Lead Time in finite capacity flowshop: A feedback loop approach	Dessevre, G. et al.	2019	Empirical Study	Defines a dynamic adjustment of the decoupled lead time, taking into account lead time variability. The results show that the dynamic adjustment of buffer sizes reduces stock while ensuring a good quality of service
23	Applicability of Demand-Driven MRP in a complex manufacturing environment	Acosta, A.P.V. et al.	2019	Exploratory longitudinal	Evaluated the applicability of DDMRP in a complex manufacturing environment (four level of nemonclature) in terms of customer satisfaction and the level of stock by simulation

Table 3: DDMRP literature review

The meaning of these research methodologies is given below:

- Comparative: comparison between two or more practices or solutions and the evaluation of the best practice or a solution (30%).
- Conceptual: basic or fundamental concepts of DDMRP (30%).
- Empirical: data for the study has been taken from an existing database, review, case study, taxonomy, or typological approaches (30%).
- Exploratory (cross-sectional or longitudinal) : the objective of the study is to become more familiar through survey, in which information is collected at one point of time (cross-sectional) or more points over time in the same organization (longitudinal) (10%) .

Since DDMRP is a new topic, so few researches related have been given. In previous works, many authors have worked with different methodologies and on different areas like reducing the lead time, optimizing the inventory level and satisfying the customer. It shows that a maximum number of publications (Ihme, M., 2015; Miclo, R. et al., 2016; Shofa, M.J et al., 2018; Kortabarria, A. et al., 2018; Miclo, R et al., 2019) have adopted the comparative and empirical study to compare and test the DDMRP with other methods like MRP, KANBAN and TOC using the simulation system.
Consequently, they seek to confirm the new concepts innovated by this approach to assess the benefits of DDMRP over other systems. While some studies developed a new model for the concepts of strategic inventory positioning to optimize it using a genetic algorithm (Rim, S. C et al., 2014; Jiang, J., and S. Rim, 2016; Jiang, J., and S. Rim, 2017). Lee, C. and S. Rim, 2019 have developed the mathematical model to propose a new safety stock model for DDMRP inventory replenishment.
As a conclusion, they recognize that their results do not show the unconditional dominance of DDMRP over MRP, Kanban or TOC, as the study is only made on a limited number of environment conditions and only one case study. Nonetheless, on the tested perimeters, DDMRP shows interesting results because it gives superior results both in low and high variability conditions. However, some studies found that the DDMRP implementation strategy did not drive a significant improvement in manufacturing performance. Therefore, none of the available frameworks/models on DDMRP concepts of strategic inventory positioning provide a step-wise guideline or process to implement DDMRP in this first step.
Unfortunately, the interpretation is made on these steps and gives the choice to practitioners to decide where to position strategic buffers based on their experience.
Consequently, many of these decisions will have a large number of scenarios to each framework. This is perhaps the most undesirable effect of an empirical exploratory study in DDMRP. There is a strong need to converge these divergent views to some standard framework.

4.1 Steps of implementing DDMRP:

In this section, we will present the relevant components in DDMRP philosophy, Strategic Inventory Planning, Buffer Profiles and Levels, and Dynamic Adjustment, which are the main steps in DDMRP. These steps are modeling, planning, and managing the supply chains to protect and to promote the information flow of through the positioning and management of stock buffers positioned at strategic decoupling points.

4.1.1 Strategic Inventory positionning:

Strategic inventory positioning is the first step in DDMRP that considers where the inventory should be positioned to identify breakpoints, to reflect the four main of variability and to compresses lead time. Putting inventory everywhere is a huge waste of corporate resources. However, eliminating inventory everywhere puts the business and the supply chain at risk. Since the variability of supply and demand is the enemy of the flow.

DDMRP offers six positioning factors for positioning the inventory. At this step, we define a new concept of DDMRP, Actively Synchronized Replenishment Lead Time (ASRLT), also called decoupling points (Ptak, C. and C. Smith, 2018). Acosta (2019) highlights the importance of strategic buffer positioning and its effect on manufacturing performance within DDMRP. Related to the implementation process, Dessevre et al., (2019) proposes a dynamic adjustment of the decoupled lead time, taking into account lead time variability.

Nevertheless, many aspects of DDMRP are subjective and depend on the planner's judgment and consultant experience to decide where to position strategic buffers, to choose the LT percentage, variability percentage, buffer profiles, and the frequency of dynamic buffer re-adjustment (Acosta, A. P. V. et al., 2019; Miclo, R. et al., 2016). Consequently, The DDMRP appears not stabilized on these aspects (Bahu, B. et al., 2019).

Although, this issue namely, the Strategic Inventory Positioning (SIP) problem on the replenishment model introduced in DDMRP, has been studied by many researchers. Rim, S. et al., (2014) presents a model to determine the optimal position and quantity of WIP inventory for a given bill of material (S-BOM), in which any part in the BOM has only one immediate parent node. The authors use the actively synchronized replenishment (ASR) lead time and propose a genetic algorithm solution to solve this problem. According to the authors, this approach is suitable for a make-to-order manufacturing in which a large number of references can exist.

Likewise, Jingjing Jiang (2016) extended the previous study to the general BOM (G-BOM) in which parts in the BOM can have more than one immediate parent and propose a new solution method using a genetic algorithm. Furthermore, Jingjing Jiang (2017) addressed the problem with a stochastic SIP problem where processing times at the nodes follow a certain probability distribution. The authors presented a solution procedure for a simple BOM case using a genetic algorithm. However, DDMRP is a new approach, so few researches related DDMRP have been given to validate these studies on the other manufacturing environments.

4.1.2 Buffer Profiles and Levels:

This step of DDMRP is to determine the amount of protection at the buffers. Buffer inventory is composed of 3 zones: Red Zone (the safety stock), Yellow Zone (the mean in-process replenishment quantity), and Green Zone (the replenishment size).

Green Zone = Max(Yellow Zone.Lead Time Factor; Lot Size)
Yellow Zone = ADU. ASRLT .PAF
Red Zone = Yellow Zone. Lead Time Factor. (1+Variability Factor)
Top Of Red = Red Zone
Top Of Yellow = Top Of Red + Yellow Zone
Top Of Green= Top Of Yellow + Green Zone.
ADU (Average Daily Usage)

Lead time	Lead-time factor range
Long	20-40% of ADU over ASRLT
Medium	41-60% of ADU over ASRLT
Short	61-100% of ADU over ASRLT

Table 4: Guideline for lead time factor

Variability	Variability factor range
High	61-100% of Red-Base
Medium	41-60% of Red –Base
Low	0-40% of Red-Base

Table 5 : Guideline for variability factor

Although the buffers must be able to absorb different sources of variability (demand, supply, management, and operations) and guarantee profitability economically (Ptak, C. and C.Smith, 2018), they do not include the supply variability factor in their dimension calculation.

Safety stock (RZ) of DDMRP replenishment is a function of the lead time factor and variability factor as determined by the guideline (Table 4 and 5) (Ptak, C. and C.Smith, 2018). However, state that there is an excessively large deviation that can be obtained by the subjective choice of the factors, so that the performance will be naturally inconsistent (Lee, C, and S. Rim, 2019).

4.1.3 Dynamic Adjustment:

Dynamic adjustment is to adjust the buffer profile to adapt company production planning to a dynamic environment. There are three types of adjustment: recalculated adjustment, planned adjustment, and manual adjustment. After setting the initial levels of strategic buffers, the DDMRP approach allows you to protect the buffer levels by adapting them to internal and external changes.

Therefore, there will be levels of strategic buffers that will be dynamic and no longer static. These adjustments also allow avoiding the risk of having a strategic stock out buffer when needed (Ptak, C. and C. Smith, 2018).

Plan Adjustment Factor (PAF) is percentage used to raise or lower the DDMRP strategic buffer size. They enable modeling and smoothing big seasonal variabilities, promotions. There are three plans adjustment factors: DAF (Demand Adjustment Factor), ZAF (Zone Adjustment Factor) and LAF (Lead time Adjustment Factor). Hence, there is a non-scientific method to calculate this factor of dynamic adjustment that must take into account operating parameters, market changes, and planned or known future events.

4.2 Promises benefits and improvements of DDMRP:

According to the Demand Driven Institute (DDI) that was founded in 2011 by Carol Ptak and Chad Smith, the DDMRP model promises benefits and improvements in the company that implement it. The DDI has shown that the companies choosing DDMRP had the following results in Table 6:

Benefit	Typical Improvements
Improved Customer Service	Users consistently achieve 97-100% on time fill rate performance
Lead Time Compression	Lead time reductions in excess of 80% have been achieved in several industry segments
Right-sizes Inventory	Typical inventory reductions of 30-45% are achieved while improving customer service

Table 6: Typical Improvements by DDMRP (Demand Driven Institute)

Those results will be compared with the different papers that will be analyzed in the state of the art of this work: table7

Author(s)	Paper	Year	Service Level	Lead Time	Inventory level	Others benefits
Miclo, R et al.	MRP vs. Demand-Driven MRP: Towards an Objective Comparison	2015	Unknown	Unknown	Reduced between 21% and 26%	Less Working Capital and less satisfying OTD
Ihme, M.	Interpreting and applying Demand Driven MRP : A case study	2015	Unknown	Unknown	Reduced high and low inventory alerts by 45%	Reduced stock outs by 95%
Ihme, M. and R. Stratton	Evaluating Demand Driven MRP: a case based simulated study	2015	Unknown	Unknown	Reduced high and low inventory alerts by 45%	Reduced stock outs by 95%
Miclo, R. et al.	An empirical study of Demand Driven MRP	2016	Unknown	Unknown	Unknown	Unsuccessful in satisfying the objective OTD less working capital (10%)
Shofa, M. J et al.	Effective production control in an automotive industry: MRP vs. Demand Driven MRP	2017	Unknown	Reduced by 94%	Unknown	No stock-out condition and improvement of the inventory level
Shofa, M. J et al.	Effective production planning for purchased part under long lead time and uncertain demand: MRP Vs Demand Driven MRP	2018	Unknown	Unknown	Reduced by 11%	
Kortabarria,A et al.	Material Management without Forecasting: From MRP to Demand Driven MRP	2018	Maintain the high service level	Unknown	Reduced by 52.53%	Material consumption increased by 8.7%
Dimas Mukhlis H. F et al.	Inventory Management using Demand Driven Material Requirement Planning for Analysis Food Industry	2019	Unknown	Unknown	Reduced by 53.5%	Material consumption increased to 10%
Miclo, M et al.	Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management	2019	Unknown	Unknown	Unknown	Higher OTD Lower Average WIP
Lee, C. and S. Rim,	A Mathematical Safety Stock Model for DDMRP Inventory Replenishment	2019	Unknown	Unknown	lower inventory level	No Inventory shortage
Bahu, B. et al.	Compréhension du DDMRP et de son adoption : premiers éléments empiriques	2019	Increased between 14% to 99%	Unknown	Reduced between 30% and 60%	
Acosta, A. P.V. et al.	Applicability of Demand-Driven MRP in a complex manufacturing environment	2019	Unknown	Reduced by 41%	Reduced by 18%	

Table 7 : DDMRP performances

At the first glance, these results are shown by DDI, from many companies across a wide array of industries, encouraging other companies to adopt this approach.
However, to gain objectivity, these results should be checked with a larger sample of companies. Furthermore, Bahu (2019) are trying to understand what DDMRP is and pinpoint why companies choose to implement DDMRP through 30 business cases. They confirm the same results promised by concepts of DDMRP in terms of customer service level and inventory reduction.

Likewise, it can be noticed that during recent years, the application of DDMRP in different types of industries is growing rapidly. Some of the organizations have reported huge benefits (Ihme, M. 2015; Ihme, M. and R. Stratton, 2015; Miclo, R et al., 2015; Jihan, M., 2017; Kortabarria, A. et al., 2018; Mukhlis, D. H. F et al., 2019; Acosta, A. P. V. et al., 2019), while many industries have not obtained the desired results (Miclo, R. et al., 2016; Miclo, R 2016; Miclo, R et al., 2019; Lee, C. and S. Rim, 2019).

Some of the literature recommended other studies, such a measurement of effectiveness in the aspect of the benefit-cost of inventory (Shofa1, M.J and W.O.Widyarto, 2017). Other authors (Kortabarria, A. et al., 2018) recommended analyzing more implementations in different sectors to improve logistical factors of companies while providing a competitive advantage. Miclo (2018) also pointed out the need for further research to uncover more aspects of DDMRP in terms of its value to manufacturing organizations.
As a conclusion, we recognize that these results do not show the unconditional dominance of DDMRP over others Manufacturing Planning and Control (MPC) System like MRPII, Kanban or TOC because these are limited numbers of academic studies and limited manufacturing and sector's environment. Nonetheless, on the tested perimeters, DDMRP shows interesting results because it gives superior results both in low and high variability conditions.

5 CONCLUSION

The Operations and Supply Chain Management fields are becoming more volatile and dynamic. Therefore, there is a need to adopt the new methods that manage efficiently the firms, protect and promote their materials and information flow to better deal with the new challenging environment demands.
DDMRP is an approach that includes a planning system managed by actual demand and a visible execution system that allows planners to react in real-time (Acosta, A. P. V. et al., 2019). The literature review on DDMRP is rare. However, the few studies have published the benefits of DDMRP philosophy promise outstanding results. The main objective of this study was to conduct a literature review to identify, classify, and analyze the DDMRP concepts and performance proposed by several academic researchers.
Based on the finding of this work, more studies will be needed to develop this literature review and to confirm objectively the benefits and disadvantages of this new approach. The outcomes of this work will give some direction of academic research and will encourage more industries to discover this new alternative manufacturing planning control system.
This study is the first to review the existing literature review on Demand Driven MRP during the period 2011 to 2019. It is also the first to extract theoretical elements to develop an integrated model. Also, this work aims to encourage research in the field of DDMRP performance and to stop researchers and practitioners from going off in unnecessary directions. Here, we highlight gaps in the existing literature as a basis for developing a research agenda.

One important limitation was the availability of papers published on this field and objectivity of some results.

REFERENCES

Acosta, A. P. V., C. Mascle, and P. Baptiste, 2019. Applicability of Demand-Driven MRP in a complex manufacturing environment. *International Journal of Production Research,*

APICS Dictionary 12 Edition

Bahu, B., L. Bironneau, and V. Hovelaque, 2019. Compréhension du DDMRP et de Son Adoption: Premiers Éléments Empiriques. *Logistique & Management: 1–13.*

Bayard, S. and F. Grimaud, 2018. Enjeux financiers de DDMRP : Une approche simulatoire. *Papier présenté à la 12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation (MOSIM). Toulouse, France*

Bennett, N., and G. James Lemoine, 2014. What a Difference a Word Makes: Understanding Threats to Performance in a VUCA World. *Business Horizons, 311–317.*

Bertrand, J. W. M., and J. C. Fransoo, 2002. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management.*

Cherrafi, A., S. Elfezazi, A. Chiarini, A. Mokhlis, and K. Benhida, 2016. The integration of lean manufacturing, six sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model. *Journal of Cleaner Production*, *139, 828- 846.*

Dangayach, G. S., and S. G. Deshmukh, 2001. Manufacturing strategy: literature review and some issues. *International Journal of Operations & Production Management*, *Vol. 21 No. 7, pp. 884-932.*

Denyer, D., and D. Tranfield, 2009. Producing a Systematic Review. *In The Sage Handbook of Organizational Research Methods, edited by D.Buchanan and A. Bryman, 671–689. London: Sage*

Dessevre, G., G. Martin, P. Baptiste, J. Lamothe, R. Pellerin, and M.Lauras, 2019. Decoupled Lead Time in finite capacity flowshop: A feedback loop approach. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 1–6.*

Favaretto, D., and A. Marin, 2018. An empirical comparison study between DDMRP and MRP in Material Management. *Dept. of Management, University Ca' Foscari Venice Cannaregio 873 30121 Venezia, Italy.*

http://www.demanddriveninstitute.com

Ihme, M., 2015. Interpreting and applying demand driven MRP: a case study. (*PhD thesis), Nottingham Trent University.*

Ihme, M., and R.Stratton, 2015. Evaluating demand driven MRP: a case based simulated study. *Paper presented at the International Conference of the European Operations Management Association*, *Neuchatel, Switzerland.*

Jiang, J., and S. C. Rim, 2017. Strategic WIP Inventory Positioning for Make-to-Order Production with Stochastic Processing Times. *Mathematical Problems in Engineering 2017.*

Jingjing, J., and S. C. Rim, 2016. Strategic Inventory Positioning in BOM with Multiple Parents Using ASR Lead Time. *Mathematical Problems in Engineering* 2016.

Kortabarria, A., U. Apaolaza, A. Lizarralde, and I. Amorrortu, 2018. Material management without forecasting: From MRP to demanddriven MRP. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 11(4), 632-650.

Laraje, N., and S. L. Elhaq, 2018. Modélisation UML des processus de planification MRP II et DDMRP : Analyse critique. *11th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management LOGISTIQUA*

Lee, C., and S. Rim, 2019. A Mathematical Safety Stock Model for DDMRP Inventory Replenishment. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering Volume* 2019 .

Martin, G., P. Baptiste, J. Lamothe, R. Miclo, and M. Lauras, 2018.Vers une cartographie de processus explicite pour le modèle Demand Driven Adaptive Enterprise. *Papier présenté à la 12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation (MOSIM).* Toulouse, France, Juin.

Miclo, R., F. Fontanili, M. Lauras, J. Lamothe and B.Milian, 2015. MRP vs. Demand-Driven MRP: Towards an Objective Comparison. *Presented at the 6th IESM Conference*.

Miclo, R., 2016. Challenging the Demand Driven MRP Promises: a Discrete Event Simulation Approach. *PhD thesis, Ecole Nationale des Mines d'Albi-Carmaux.*

Miclo, R., F. Fontanili, M. Lauras, J. Lamothe, and B. Milian, 2016. An Empirical Study of Demand-Driven MRP. *Paper presented at the 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS).* Bordeaux, France, June.

Miclo, R., M. Lauras, F. Fontanili, J. Lamothe and S.A.Melnyk, 2018. Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management. *International Journal of Production Research*, 1-16.

Mukhlis, D. H. F, J. IndraEfrialdi and E. Rimawan, 2019. Inventory Management using Demand Driven Material Requirement Planning for Analysis Food Industry. *International Journal of Innovative Science and Research Technology.*

Pekarciková, M., P. Trebuna, M. Kliment and J. Trojan, 2019. Demand driven materialrequirements planning: Some methodical and practical comments. *Management and production engineering review,* 10(2), 50 -59

Ptak, C., and C.Smith, 2011. Orlicky's Material Requirements Planning (thirded.). *McGraw Hill Professional*

Ptak, C., and C.Smith, 2018. Demand Driven MaterialRequirements Planning (DDMRP). *IndustrialPress.*

Rim, S. C., J. Jiang, and C. Lee, 2014. Strategic Inventory Positioning for MTO Manufacturing Using ASR Lead Time. In Golinska, P. (Ed.), *Logistics Operations, Supply Chain Management and Sustainability (441-456). Springer International Publishing.*

Seuring, S., and M. Müller, 2008. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *J. Clean. Prod*. 16, 1699e1710.

Shofa, M. J, A. O. Moeis and N. Restiana, 2017. Effective production planning for purchased part under. long lead time and uncertaindemand: MRP Vs demand-driven MRP. *International Conference on Industrial and System Engineering* (IConISE)

Shofa, M. J., and W. O. Widyarto, 2017. Effective production control in an automotive industry: MRP vs. demand-driven MRP. *American Institute of Physics, vol. 1855, no. 1, Article ID 020004,.*

Thomé, A. M. T., L. F. Scavarda and A.J.Scavarda, 2016. Conducting systematic literature review in operations management, *Production Planning & Control*.

Webster, J., and R. T. Watson, 2002. Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. *MIS* Q. 26 (2), 13e23.

A Multi-objective Approach for the Combined Master Surgical Schedule and Surgical Case Assignment Problems

Salma MAKBOUL
MCS Laboratory
FSTF USMBA
Fez, MOROCCO
salma.makboul@usmba.ac.ma

Said KHARRAJA
LASPI
Univ-Lyon, Univ Saint Etienne
Roanne, FRANCE
said.kharraja@univ-st-etienne.fr

Abderrahman ABBASSI
Faculty of Sciences Semlalia
Cadi Ayyad University
Marrakech, MOROCCO
abbassi.abdarrahman@gmail.com

Ahmed EL HILALI ALAOUI
Euromed University
Fez, MOROCCO
a.elhilali-alaoui@ueuromed.org

ABSTRACT: *In this study, we propose a multi-objective approach to address the Master Surgical Schedule (MSS) and the Surgical Case Assignment (SCAP) problems for the common Operating Theater (OT) in an integrated hospital facility. The approach accounts for both surgeons' and Operating Rooms' (OR) availability and restrictions. We propose in this paper a multi-objective programming model that supports OT decision making to ensure patients' and surgeons' satisfaction and hospital quality of service by respecting surgeries due dates and balancing surgeons' workloads. The proposed approach determines the surgical discipline to perform on each session, the surgical cases assigned on each session, and the operations' start time on a weekly basis. The ε-constraint method is used to solve the multi-objective problem. The computational experiments are performed using ILOG CPLEX optimization studio. The model is tested on the empirical data archives of a medium-size French hospital and show the quality of solutions achieved using the proposed approach.*

KEYWORDS: Operating Theater Planning, Multi-objective Programming, Master Surgical Schedule, Surgical Case Assignment, epsilon-constraint method.

1 INTRODUCTION

The OT is both the cost and revenue center of the hospital (Zhu et al., 2018). Efficiently managing its resource can strongly impact the quality of health service.

Given patients waiting list, OR characteristics and surgeons' timetable, the planning consists of deciding the scheduling of patients to be performing during the planning horizon according to multiple performances factors such as ORs' utilization, patients' due dates, throughput, etc.

The surgeries are performed within the OR sessions, an OR session is a half or full day. The OT problem are studied under three strategies, the open scheduling strategy, the block scheduling strategy and the modified block scheduling strategy.

The block scheduling strategy is to allocate the OR to different surgeons or group and it is more performed in European hospital. Its advantages are reducing planning complexity. However, the block scheduling strategy may present some issues, since the ORs session can only be allocated to one surgeon, even if the surgeon does not perform any surgical case. This is the reason why the modified block scheduling is introduced (Younespour et al., 2019). The open scheduling strategy is more flexible than the block scheduling strategy because no pre-specified session to discipline assignment exists (Agnetis et al., 2014). In the open scheduling strategy the scheduling follows the principle of first-come first-served (Augusto et al., 2010). It is more performed in the American hospitals (Zhu et al., 2018).

The OT managers face complex problem to give an efficient planning, the problems include:

- Deciding which surgical specialty to perform on each OR session
- Assigning the patients to the OR session according to several factors
- Sequencing the elective patients on each OR session

The first problem is tactical; it involves the Master Surgical Schedule problem (MSS). The second and third problems are operational; the second is the Surgical Case Assignment problem (SCAP) and the third problem is the Elective Surgery Sequencing problem (ESS).

In this paper, we present a new approach to support OT management; we define the MSS on a weekly basis and allocate surgeries to ORs with taking into account resources' availability and various OT restrictions. Balancing surgeons' workload is one of the important factors to ensure surgeons' satisfaction and provide a better quality of service.

The approach proposed is a multi-objective programming model that aims to balance surgeons' workload and select the patients from the waiting list according to their due dates.

Given the multi-objective nature of the problem, the ε-constraints method is applied to reach solutions from the Pareto Front using different ε values.
The reminder of this paper is as follows. The literature review of OT management related works is presented in Section 2. The problem is described in detail in Section 3. Mathematical formulation is presented and described in Section 4. Section 5 presents the computational results of the proposed approach. Finally, Conclusions and perspectives are given in Section 6.

2 LITERATURE REVIEW

In past years, OT management and scheduling was reviewed by several researchers.
The decision levels are organized into three levels: long-term strategic, medium-term tactical and short-term operational.
At the strategic level, the problem involves capacity planning, capacity allocation, and case-mix problems. The decisions made at the strategic level are applied in a planning horizon of several months (Blake et al. 2002).
(Ma and Demeulemeester, 2013) proposed an approach to combine capacity allocation with case-mix. (Creemers et al., 2012) studied the problem of allocating service time slots to different patient classes to minimize the total expected waiting time of a patient.
The tactical level involves the Master Surgical Scheduling problem (MSS) and it is the problem under study in this paper. The MSS is a cyclic timetable; it allocates the surgical disciplines to OR under their requirements.
(Cardoen et al., 2009) defined a MSS that decides the amount and type of available ORs, the open hours, and the surgeons. (Agnetis et al., 2014) introduced a decomposition approach to address the MSS and SCAP by assigning the disciplines to the available sessions first and then allocate surgeries to them on a weekly basis.
(Adan et al., 2009) proposed an approach to generate a MSS that aims to optimize the utilization of resources by considering stochastic length of stay.
The operational level involves the Surgery Scheduling Problem (SSP) following tactical level decisions. The SSP problem is divided into two steps; the first step is the advance scheduling, referred in the literature as the Surgical Case Assignments problem (SCAP) and allocation scheduling problem. The SCAP is to assign an OR and a day to surgeries, while the allocation schedule defines the start time of surgeries.
(Dios et al. 2015) introduced a decision support tool to deal with the surgery advance scheduling problem. (Vancroonenburg et al., 2015) proposed an approach to solve the allocation scheduling problem following the advance scheduling step.
Some authors deal with both advanced and allocation problems (Aringhieri et al., 2015, Marques et al., 2012, Riise and Burke, 2011).
Several solution approaches have been proposed to deal with multi-objective problems. Exact methods compute the entire Pareto Front while the heuristic search for solutions close to Pareto-optimal solutions (Abounacer et al., 2014) (Ehrgott and Gandibleux, 2002).
One of the classical methods to handle a multi-objective problem is the ε-constraint method. This approach was introduced by (Haimes et al., 1971) and defined as one of the objective functions that are selected to be optimized while the other(s) are added as an additional constraint in the optimization problem.
The proposed approach in this study is a bi-objective problem solved using the ε-constraint method and aims to satisfy the surgeons and patients and ensure a good quality of service. It is considered as a combination between the MSS and the SSP that handles both SCAP and allocation problem. The proposed approach accounts for the availability of both human and material resources.

3 PROBLEM DESCRIPTION

This study addresses OT management, we decide which specialty to be performed on ORs session and allocate surgical cases to them with taking into account OT restrictions. Each surgical case has:

- Processing time (duration of the surgical cases, we assume that the surgical cases are deterministic)
- Due date (the nominal date for the surgical case to be performed)
- Surgery discipline to be assigned to.

The MSS is subject to various restrictions that must be taking into consideration:

- Discipline-to-OR restrictions. Some surgical disciplines can only be performed in a restricted set of ORs.
- Limits on discipline parallelism. A limited number of ORs session of the same discipline can take place at the same time
- OR sessions-per-discipline restrictions. Lower and upper limits to the number of OR sessions assigned
- OR reservation. The hospital management may reserve some OR sessions to certain surgical disciplines

We assume that surgeons have a timetable and are not available all days in the planning horizon.
The first objective function in this study depends on how close is the surgery to its due date $K_{i\,s} = (W - R_{i\,s})$ where $R_{i\,s}$ defines the days to the due date and W is the maximum waiting time for low-priority surgeries.
The second objective is considered to ensure a good quality of service. It aims to balance surgeons' workload over the planning horizon. To do this, we maximize the minimum utilization factor of surgeons during the planning horizon to ensure a fair workload for all surgeons.
The quality of service is also maintained by respecting patients' due dates as much as possible. The two objectives are conflicting. Because balancing surgeons workload may ignore surgeries' due date and vice versa.

In the following model, we assign a dummy patient (1) to each OR session. Each session starts and ends with the dummy patient 1 to simplify modeling and sequencing.

4 MATHEMATICAL MODELING

4.1 Parameters

$\mathbf{S}$: Set of surgical disciplines

$\mathbf{I_s}$: Waiting list of surgeries in discipline s

$\mathbf{C_s}$: Set of surgeons in discipline s

$\mathbf{R_{is}}$: Days to the due-date (nominal date) for patient i of disciplines

$\mathbf{P_{is}}$: Expected duration of patient iof discipline s

$\mathbf{Ro}$: Set of the operating rooms

$\mathbf{K_{is}}$: The score for surgery I of discipline s

$\mathbf{O^{max}}$: OR session capacity

$\mathbf{J}$: Set of days

$\mathbf{NOS_s^{max}}$: Maximum number of OR session for discipline s

$\mathbf{NOS_s^{min}}$: Minimum number of OR session for discipline s

$\mathbf{POS_s}$: Maximum number of parallel OR session for discipline s

$\mathbf{NAR_s}$: Set of non-available ORs for discipline s

$\mathbf{WT}$: Maximum waiting time for low-priority surgeries

$$\mathbf{av_{dj}} = \begin{cases} 1 \text{ if surgeon } \mathbf{d} \text{ is available the day } \mathbf{j} \\ 0 \text{ else} \end{cases}$$

$\mathbf{M}$: Very large number

4.2 Indexes

$\mathbf{i, l}$: Patients
$\boldsymbol{d}$: Surgeon
$\boldsymbol{s}$: Discipline
$\boldsymbol{j}$: Day
$\boldsymbol{r}$: Operating room

4.3 Decision variables

$$\mathbf{x_{isrj}} = \begin{cases} 1 \text{ if patient i of discipline s is assigned} \\ \text{to room r on day j} \\ 0 \text{ else} \end{cases}$$

$$\mathbf{y_{srj}} = \begin{cases} 1 \text{ if discipline s is assigned to room r on day j} \\ 0 \text{ else} \end{cases}$$

$$\mathbf{z_{dsrj}} = \begin{cases} 1 \text{ if surgeon d of discipline s} \\ \text{is assigned to room r on day j} \\ 0 \text{ else} \end{cases}$$

$$\mathbf{w_{ilrj}} = \begin{cases} 1 \text{ if the patient l is operated immediatly} \\ \text{after the patient i in room r on day j} \\ 0 \text{ else} \end{cases}$$

$\mathbf{ST_{is}}$: Start time of surgical case i of discipline s

$\mathbf{L}$: The minimal operability factor of the surgeon that we aim to maximize in order to ensure a fairness workload

$\mathbf{L_{ds}}$: The operability of the surgeon d of the discipline s during the planning horizon, given by the following formula:

$$\frac{\sum_{r \in Ro} \sum_{j \in J} \mathbf{z_{dsrj}}}{|\mathbf{J}|} = \mathbf{L_{ds}} \quad \forall \, \boldsymbol{s} \in \boldsymbol{S} \quad \forall \mathbf{d} \in \mathbf{D}$$

4.4 Bi-objective Programming model

The two objectives considered in this study:

$$\mathbf{F_1 = maximize} \sum_s \sum_i \sum_r \sum_j \mathbf{x_{i\,s\,r\,j} K_{i\,s}} \quad \mathbf{(1)}$$
$$\mathbf{F_2 = maximize\ L} \quad \mathbf{(2)}$$

Subject to:

$$\sum_{r \in Ro} \sum_{j \in J} \mathbf{x_{i\,s\,r\,j}} \leq \mathbf{1} \qquad \forall \, \mathbf{s} \in \mathbf{S}, \ \forall \mathbf{i} \in \mathbf{I_s} | \, \mathbf{i} \neq \mathbf{1} \qquad \mathbf{(3)}$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in I_s} \mathbf{P_{is}} \times \mathbf{x_{isrj}} \leq \mathbf{O_{max}} \qquad \forall \mathbf{r} \in \mathbf{Ro}, \ \forall \mathbf{j} \in \mathbf{J} \qquad \mathbf{(4)}$$

$$\sum_{i \in I_s} \mathbf{x_{i\,s\,r\,j}} \leq \mathbf{M} \times \mathbf{y_{s\,r\,j}} \qquad \forall \mathbf{s} \in \mathbf{S}, \ \forall \mathbf{r} \in \mathbf{Ro}, \forall \mathbf{j} \in \mathbf{J} \qquad \mathbf{(5)}$$

$$\sum_{s \in S} \mathbf{y_{s\,r\,j}} \leq \mathbf{1} \qquad \forall \mathbf{r} \in \mathbf{Ro}\,, \forall \mathbf{j} \in \mathbf{J} \qquad \mathbf{(6)}$$

$$\sum_{r \in Ro} \sum_{j \in J} \mathbf{y_{s\,r\,j}} \leq \mathbf{NOS^{max}} \qquad \forall \mathbf{s} \in \mathbf{S} \qquad \mathbf{(7)}$$

$$\sum_{r \in Ro} \sum_{j \in J} \mathbf{y_{s\,r\,j}} \geq \mathbf{NOS^{min}} \qquad \forall \mathbf{s} \in \mathbf{S} \qquad \mathbf{(8)}$$

$$\sum_{r \in Ro} \mathbf{y_{s\,r\,j}} \leq \mathbf{POS_s} \qquad \forall \mathbf{s} \in \mathbf{S}, \forall \mathbf{j} \in \mathbf{J} \qquad \mathbf{(9)}$$

$$\sum_{r\in NAR_s}\sum_{j\in J} y_{s\,r\,j} = 0 \qquad \forall s \in S \qquad (10)$$

$$x_{1\,s\,r\,j} \le y_{s\,r\,j} \qquad \forall s \in S, \forall r\ Ro, \forall j \in J \qquad (11)$$

$$\sum_{l\in I_s} w_{i\,l\,r\,j} = \sum_{l\in I_s} w_{l\,i\,r\,j} \qquad \forall s \in S, \forall i \in I_s | i \neq 1, \forall r \in Ro, \forall j \in J \qquad (12)$$

$$x_{i\,s\,r\,j} = \sum_{l\in I_s / i\neq l} w_{i\,l\,r\,j} \qquad \forall s \in S, \forall i \in I_s | i \neq 1, \forall r \in Ro, \forall j \in J \qquad (13)$$

$$y_{s\,r\,j} = \sum_{d\in C_s} z_{ds\,r\,j} \qquad \forall s \in S, \forall r \in Ro, \forall j \in J \qquad (14)$$

$$z_{ds\,r\,j} \le av_{d\,j} \qquad \forall s \in S, \forall d \in C_s, \forall r \in Ro, \forall j \in J \qquad (15)$$

$$\sum_{r\in Ro} z_{ds\,r\,j} \le 1 \qquad \forall s \in S, \forall d \in C_s, \forall j \in J \qquad (16)$$

$$L_{ds} \ge L \qquad \forall s \in S, \forall d \in D \qquad (17)$$

$$ST_{ls} \ge ST_{is} + P_{is} - (1 - w_{ilrj}) \times M \qquad \forall s \in S, \forall (i,l) \in I_s | l \neq 1, \forall r \in Ro, \forall j \in J \qquad (18)$$

Constraints (3) guarantee that a surgical case can be performed at most once. Constraints (4) state an upper limit to surgeries processing time in each OR session. Constraints (5) guarantee that patients of a surgery discipline are assigned to an OR session only when the session is open for that discipline. Constraints (6) guarantee that at most one surgical discipline assigned to an OR on a day. Constraints (7-8) bound the number of weekly OR session assigned to each discipline. Constraints (9) limit the number of parallel OR session assigned to the same surgical discipline. Discipline-to-OR restrictions are considered by constraints (10). Constraints (11) ensure that the dummy patient is assigned to each OR session. Constraints (12)-(13) guarantee the sequencing of the surgeries. Constraints (14) guarantee that one surgeon is assigned at most to an OR session in a day. Availability of surgeons in days is taken into account by constraints (15). Constraints (16) ensure that a surgeon is assigned at most to one OR on a day. Constraints (17) ensure that the workload of each surgeon is greater than the operability factor that we aim to maximize. Constraints (18) compute the start time of surgeries.

4.5 ε -constraint method:

The main of the ε-constraint method is to allow the multi-objective problems to be cast as a single objective problem by selecting one of them. The other objective functions will act as the constraints within some specified values.
Moreover, the Pareto Front of a bi-objective problem can be efficiently generated using ε-constraint (Bérubé et al., 2007); different Pareto optimal solution can be found using different ε values.
The model (1)-(18) is transformed:

maximize F_1

Subject to:

(3)-(18)

$$F_2 \ge \varepsilon_2 \qquad (19)$$

The selected ε_2 must be in range of $F_2^{min} \le \varepsilon_2 \le F_2^{max}$.
Since the multi-objective problem under study is a bi-objective problem, the ε-constraint method only need range bound (lower and upper bound) of one objective function.
To generate as many Pareto optimal solutions as possible, the right-hand side of constraint (19) is gradually increased by a small amount and the problem is solved whenever ε_2 is increased (Dermir et al., 2014).

5 COMPUTATIONAL EXPERIENCE

The database is taking from the archives of a French medium-sized hospital. The OR session is a full day and takes 450min. The hospital has 8 OR, one of them is devoted to the emergencies (EMR). All ORs are equipped with the same materials but some of them are more suitable for some disciplines than others.
The surgeons are grouped according to their discipline and availability.
We have tested the model with different size of the OT; 8 ORs, 12 ORs and 16 ORs and two different patients' waiting list sizes: 140 and 180 patients. We set $WT = 90$
In the following, the notation P.X, R.Y is used to denote a given instance with X patients in the waiting list and Y OR in the OT.
20 surgeons are appointed to treat the patients according to the timetables and disciplines.

Discipline	Surgeons
Genecology (GYN)	{1,2,3}
Ambulatory Surgery(DS)	{4,5,6,7,8,9,10,11}
Urology(URO)	{12,13,14}
Orthopedic Surgery (ORTH)	{15,16,17}
Vascular Surgery (VAS)	{18,19,20}

Table1. Surgeons' discipline

Table 1 gives the surgeons according to their disciplines.

Discipline	NAR_s	NOS_s^{min}	NOS_s^{max}	POS_S
Genecology	{1,4,5,6,7,8}	3	9	1
Ambulatory surgery	{8}	4	12	2
Urology	{1,2,8}	2	9	1
Orthopedic surgery	{2,3,5,6,7,8}	3	11	2
Vascular surgery	{1,2,3,4,5,6,8}	4	8	1

Table2. Discipline-to-OR restrictions for instance (P.140, R.8)

Table 2 shows discipline-to-OR restrictions for instance (P.140, R.8).
NAR_s is the set of OR that can not be used by discipline s. For example vascular surgery can only use OR 7. The third and fourth columns give lower and upper number of OR session for each surgery discipline. The last column shows the number of possible parallel session of each discipline.
The model is implemented using CPLEX Optimization Studio 12.6, in an Intel® Core™ i5 and 6 Go Ram.
In order to compute the epsilon values for ε-constraint method, the first step is to compute the (lower and upper) bounds of the auxiliary objective F_2.
To generate many Pareto optimal solutions for the problem, the right-hand side of constraint (19) is gradually increased by a small amount and the problem is solved whenever ε_2 increased.

	(S1)	(S2)	(S3)
(P.140,R.8)	**8175**	**8198**	**7998**
(P.140,R.12)	**9388**	**9236**	**9253**
(P.140,R.16)	**10151**	**10196**	**10102**
(P.180,R.8)	**7918**	**8231**	**8127**
(P.180,R.12)	**9454**	**9436**	**9512**
(P.180,R.16)	**10208**	**10325**	**10415**

Table 3. Numerical results

Numerical results are given in Table 3. We computed three solutions from the Pareto optimal Front.

	MONDAY	TUESDAY	WEDNSDAY	THURSDAY	FRIDAY
R=1	ORTH (15)	DS (5)	ORTH (17)	DS (6)	ORTH (16)
R=2	DS (11)	EMPTY	GYN (2)	GYN (1)	DS (9)
R=3	GYN (3)	GYN (3)	EMPTY	DS (11)	GYN (2)
R=4	ORTH (16)	ORTH (17)	DS (5)	ORTH (17)	ORTH (15)
R=5	URO (14)	URO (13)	URO (12)	URO (13)	DS (7)
R=6	DS (4)	DS (10)	DS (8)	EMPTY	URO (12)
R=7	VAS (20)	VAS (18)	VAS (20)	VAS (19)	VAS (19)
R=8	EMR	EMR	EMR	EMR	EMR

Table 4. MSS planning for instance (P.140, R.8)

Table 4 shows the results of the MSS and surgeons in each OR session using the proposed approach. The planning respect discipline-to-OR restrictions and resources' availability. The obtained results show the good balancing of surgeons' workload.

6 CONCLUSION

In this paper, we proposed a multi-objective programming model that aims to balance surgeons' workload and respect surgeries due dates according to resources' availability and OT restrictions.
The multi-objective problem is solved using ε-constraint method and compute several solutions from the Pareto Front. We believe that the approach proposed consists in a good tool to evaluate the quality and efficiency of the OT management. This study could be extended to include downstream hospital resources' availability to build an efficient planning to the OT.

REFERENCES

Abounacer, R., M. Rekik, and J. Renaud, 2014. An Exact Solution Approach for Multi-objective Location Transportation Problem for Disaster Response. *Computers & Operations Research*, 41, p. 83-93.

Adan, I., J. Bekkers, N. Dellaert, J. Vissers, and X. Yu, 2009. Patient mix optimization and stochastic resource requirements: a case study in cardiothoracic surgery planning. *Health Care Manag Sci*, 12(2), p. 129-141.

Agnetis, A., A. Coppi., M. Corsini, G. Dellino, C. Meloni, and M. Pranzo, 2014. A decomposition approach for the combined master surgical schedule and surgical case assignment problems. *Health Care Manag Sci*, 17(1), p. 49-59.

Aringhieri, R., P. Landa, and E. Tànfani, 2015. Assigning surgery cases to operating rooms: a VNS approach for leveling ward beds occupancies. *Electron Notes Discrete Math*, 47, p.173-180.

Augusto, V., X. Xie, and V. Perdomo, 2010. Operating theatre scheduling with patient recovery in both operatingrooms and recovery beds. *Comput Ind Eng*, 58(2), p. 231-238.

Bérubé, JF., M. Gendreau, and JY. Potvin, 2009. An exact [epsilon]-constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the Traveling Salesman Problem with Profits, *European Journal of Operational Research*, 194(1), p. 39-50.

Blake, JT., J. Donald, and S. Ball, 2002. Mount Sinai hospital uses integer programming to allocate operating room time. *Interfaces*, 32(2), p. 63-73.

Cardoen, B., E. Demeulemeester, and J. Beliën, 2009. Sequencing surgical cases in a day-care environment: an exact branch-and-price approach. *Comput Oper Res*, 36(9), p. 2660-2669.

Chankong, V. and Y. Haimes, 1983. Multi-objective Decision Making: Theory and Methodology, North-Holland.

Creemers, S., J. Beliën, and M. Lambrecht, 2012. The optimal allocation of server time slots over different classes of patients. *Eur J Oper Res*, 219(3), p. 508-521.

Demir, E., T. Bektaş, and G. Laporte, 2014. The bi-objective Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 232(3), p. 464-478.

Dios, M., JM. Molina-Pariente, V. Fernandez-Viagas, JL. Andrade-Pineda, and JM. Framinan, 2015. A decision support system for operating room scheduling. *Comput Ind Eng*, 88, p. 430-443.

Haimes, Y., L. Lasdon, and D. Wismer, 1971. On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,* vol. 1, p. 296-297.

Ma, G. and E. Demeulemeester, 2013. A multilevel integrative approach to hospital case mix and capacity planning. *Comput Oper Res*, 40(9), p. 2198-2207.

Marques, I., ME. Captivo, and MV. Pato, 2012. An integer programming approach to elective surgery scheduling. *OR Spectr*, 34(2), p. 407–427.

Riise, A., and EK. Burke, 2011. Local search for the surgery admission planning problem. *J Heuristics*, 17(4), p. 389-414.

Vancroonenburg, W., P. Smet, and G. Vanden Berghe, 2015. A two-phase heuristic approach to multi-day surgical case scheduling considering generalized resource constraints. *Oper Res Health Care*, 7, p. 27-39.

Younespour, M., A Atighehchian, K. Kianfar, and ET. Esfahani, 2019. Using mixed integer programming and constraint programming for operating rooms scheduling with modified block strategy. *Operations Research for Health Care*, 23.

Zhu, S., W. Fan, S. Yang et al., 2018. Operating room planning and surgical case scheduling: a review of literature. *J Comb Optim*, 37, p. 757–805.

A Three-stage Approach for the Multi-period Green Home Health Care Problem with Varying Speed Constraints

Salma MAKBOUL
MCS Laboratory
FSTF USMBA
Fez, MOROCCO
salma.makboul@usmba.ac.ma

Said KHARRAJA
LASPI
Univ-Lyon, Univ Saint Etienne
Roanne, FRANCE
said.kharraja@univ-st-etienne.fr

Abderrahman ABBASSI
Faculty of Sciences Semlalia
Cadi Ayyad University
Marrakech, MOROCCO
abbassi.abdarrahman@gmail.com

Ahmed EL HILALI ALAOUI
Euromed University
Fez, MOROCCO
a.elhilali-alaoui@ueuromed.org

ABSTRACT: *In this paper, we address an environment-friendly approach to solve the Green Home Health Care (GHHC) routing and assignment problem. The approach aims to reduce fuel consumption to minimize carbon-di-oxide emissions. The Home Health Care (HHC) routing and assignment problem is a very complex problem due to the multi-factors and criteria that must be taken into consideration during the planning. The main of this work is to find an efficient working plan on a weekly basis, respecting continuity of care, with environmental concern, which ensures the satisfaction of both patients and caregivers and considers most of HHC constraints. The proposed approach is a three-stage methodology; the first stage is a multi-objective programming model that minimizes the total traveled distance and fuel consumption with varying speed. In the second stage, we introduce an assignment heuristic, and the third stage is an Integer Linear Programming (ILP) model that aims to balance caregivers' workload. The small and medium instances are solved using CPLEX optimizer studio and show that better route planning and minimum fuel consumption is achieved with varying speed concept.*

KEYWORDS: Green home health care, multi-objective optimization, integer linear programming, human resource planning, routing problem, continuity of care.

1 INTRODUCTION

HHC is a wide variety of health care services that are provided to patients at home. The HHC agencies receive requests from new patients every day, and need an efficient planning to manage their caregivers.

The increased costs of the subsequently required treatments pressure the primary care facilities to offer care services at home to reduce charges. The goal of these programs is to reduce the hospitalization rate and congestion (Lanzarone and Matta, 2012).

The HHC services improve patients' living conditions, particularly for those requiring assistance and medical treatment (Fikar et al., 2017).

In this paper, we discuss related optimization problems that occur in the HHC. During a planning horizon, a set of patients must be allocated to a group of qualified caregivers according to the treatment they need. The problem asks to schedule the patients according to their request and required care regarding their time window, i.e. the patient may not be available all through the day.

In addition, the patients are allocated by taking into consideration the compatibility between patient and caregivers' expertise. They may also have requests that must be taken into account, for example: caregiver preferences, gender, language, etc. For this reason, we take into account the affinity between the caregiver and the patient.

We take into consideration the learning care factor (Gillan et al., 2013) which represents the experience gained by the caregivers through the planning horizon while giving the care to patients. This experience allows the caregivers to be more efficient because they become more accustomed to the patients. Hence, the time required for care to be given would be systematically reduced. The learning care is improving by the continuity of care, i.e., the patients are assigned to a limited number of caregivers during the planning horizon, which makes the problem more difficult and challenging to solve. Moreover, the health of the patients improves through the planning horizon, in consequence, the time required by the patient decrease.

The HHC transport system is designed to transform caregivers by cars to their patients. With regard to these organizational activities, one of the majorities of Green House Gaze (GHG) emission is the emission of co_2. In real life, a vehicle is not able to travel at a constant speed. It is expected to travel under a maximum and minimum speed limit. Experiments made with constant and varying speed show that fuel consumption is reduced using varying speed constraints (Poonthalir and Nadarajan, 2018).

In this paper, we discuss the fuel-GHHC with varying speeds that uses triangular distribution to minimize both the traveled distance of the routes and fuel consumption.
To maintain caregivers' job satisfaction and service quality in the HHC, one of the objectives considered is to "master the overload risk" by balancing the caregivers' workload to reduce the excessive assignment and to satisfy the majority of patients by allowing them to be visited, if it is possible, by their preferred caregivers. To achieve the workload balancing, we have adopted (Cappanera and Scutella, 2015) technique to maximize the minimum utilization factor caregiver in the planning horizon in order to ensure a fair workload for all caregivers.
The quality of service requisites, the workload of each caregiver on each period, i.e., the sum of the daily service times and traveling times of the caregiver, cannot exceed the duration of the caregiver workday are taking into consideration.
This paper addresses a new environmental-friendly approach for the routing problem in the GHHC through reducing fuel consumption that leads to minimizing carbon dioxide with varying speed constraint and the satisfaction of both patients and caregivers in the home health care multi-period problem.
The main contribution of this work is developing a new approach for the GHHC; we take into consideration simultaneously the set of the following criteria:

- Balanced workload among caregivers
- Affinity between the patient and the caregiver
- Minimizing the total consumption of the fuel
- Minimizing the distance between the patients

And the following constraints:

- Adequacy between patient's needs and caregiver's skills
- Availability of patients
- Precedence of care
- Synchronization of cares
- Continuity of the care
- Maximum daily workload of the caregivers
- Varying speed routes

The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 presents a literature review of the works related to the HHC. Section 3 is devoted to describe the problem and present the models, variables, and parameters. Computational results are given in Section 4. Finally, conclusions are given in Section 5 with future work perspectives.

2 LITERATURE REVIEW

Different studies related to the human resources planning (Cissé et al., 2017). At the strategic level, the districting problem considers the division of the region into districts to reduce the workload and the travel workload of the nurses according to several criteria for example the balancing of workloads among the designed districts. (Benzarti, 2012) developed two mathematical models of the districting problem. Resource dimensioning is done at a tactical level, tackles the issue of defining the level of resources available at HHC and distributing the services to the districts.
Two major issues arise on the operational level: the caregiver assignment issue and the routing and scheduling issue for home health services.
In this paper, we address an operational problem related to assignment and routing problem aiming at assigning the patients to the caregivers and define the order and the time in which visits of caregivers to patients should be performed.
(En-nahli et al., 2015) developed a multi-objective mixed-integer linear for a daily HHC management by taking into consideration the affinity between the patients and the staff together and the skill constraints. The four objectives in the work were the cost, workload level, satisfaction level, and waiting time. (Cappanera and Scutella, 2015) developed a mixed linear integer to manage nurses' workload and reduce their waiting time. In their model, the authors find the idea of pattern to plan several visits to the same individual during the week. (Bertels and Fahle, 2006) presented a combination of linear programming, constraints programming and metaheuristics for a HHC problem that considers the staff rostering and vehicle routing components while minimizing transportation costs and maximizing satisfaction of the patients and nurses. (Moussavi et al., 2019) proposed a metaheuristic approach to the integration of worker assignment and vehicle routing problems, the work consist on finding the optimal services schedules for each one of the staff members so that the total and individual distance traveled by the staff is minimized. (Shi et al., 2017) proposed a heuristic algorithm integrated into a hybrid genetic algorithm and a Monte Carlo method to address the HHC routing and scheduling problem with fuzzy demand.
(Ben Bachouch et al., 2008) developed a mixed linear programming model of vehicle routing problem while respecting the availability of patients, breaks meals for staff, and shared visits to minimize the total distance traveled by the nurses. (Ehmke et al., 2015) considered the problem as a vehicle routing issue with time windows, in their case. They suggested a solution to guarantee the quality of service provided to all customers while the purpose of the problem is the classic VRP objective which is the cost of routing. Moreover, the paper studies the stochastic travel times. (Lanzarone et al., 2012) proposed mathematical programming models to balance the caregiver' workload under different categories. They considered the care's continuity constraint, caregiver's skills, and the districts where the patients and the caregivers belong. The patients' demands are considered either in a deterministic or stochastic way. (Kergosien et al., 2009) developed a Mixed Integer Linear Programming (MILP) for the HHC planning, they consider the problem as an extension of Multiple Travelling Salesman Problem with Time Window (mTSPTW) that aims to reduce costs of travel times between patients with additional constraints specific to the HHC: patients' availability, skills of

caregivers, preferences of the patients for caregivers, synchronization of multiple treatments for the same patient.

The problem discussed in this paper is a variant of the problem of multi-period human resources' planning in which one-period assignment has an effect on assignments for next periods. (Moussavi et al., 2017) presented a sequencing assignment model for weekly human resource planning. They proposed two metaheuristic approaches to solve the Sequencing Generalized Assignment Problem (SGAP).

The green vehicle routing problem (GVRP) was proposed by (Erdogan and Miller-Hooks, 2012). The objective of the problem is to devise low cost route for a set of homogenous vehicles stationed at a depot. Each vehicle takes a tour serving a set of geographically distributed customers with limited fuel capacity and time. The Fuel GVRP (FGVRP) with varying speed was proposed by (Poonthalir and Nadaraja, 2018) and it is used in this paper. The GVRP is a single objective problem that aims to reduce total route cost. While, the FGVRP is a bi-objective problem that aims to reduce both route cost and fuel consumption.

Experiments prove that varying speed reduce fuel consumption which lead to reduce carbon-di-oxide emissions (Poonthalir and Nadaraja, 2018).

In the literature, less environmental/green interest addressed to HHC. (Fathollahi-Fard et al., 2018) proposed a first GHHC approach using bi-objective optimization. The approach uses a number of modification and hybrid versions of metaheuristics and four heuristics. Later, (Fathollahi-Fard et al., 2019) introduced a GHHC and solve the problem using modified simulated annealing algorithms.

In this work, a new GHHC approach for the multi-period consists of three-stage methodology. The decomposition reduces the computational time required to solve the problem. The first stage aims to determine the packages needed in each day. The second and third stage aims to assign the packages defined in the first stage to the suitable/available caregivers while balancing the workload and maintaining the continuity of care.

3 PROBLEM DESCRIPTION AND MODELING

We consider a set of patients needing heterogeneous health care services. The problem consists in routing and scheduling caregivers to patients over a multi-period planning horizon taking into account multiple constraints involving, for example, patients' time windows and preferences, caregivers' skills and working hours, continuity of care, and workload balance. In addition, some patients may need to be serviced by two caregivers at the same time. The learning care factor is also considered in our work, which is expressed by the gradual reduction of the treatment duration as the caregiver becomes familiar with tasks performed for the same patient.

Triangular distribution:

A triangular distribution is a continuous probability distribution shaped like a triangle. It is defined by:
a: the minimum value, where $a \leq c$,
c: the peak value, where $a \leq c \leq b$,
b: the maximum value, where $b \geq c$.
The probability density function for a triangular distribution is defined as follows:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \dfrac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a \leq x \leq c \\ \dfrac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & c \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases}$$

Triangular distribution is more flexible than normal distribution (Poonthalir and Nadaraja, 2018). Using triangular distribution is best interpreted. As vehicle speed fluctuates between a minimum and a maximum speed, which will travel at any of the most possible speed.

To know the average speed between an initial speed limit a and a maximum speed limit$b$, one has to calculate:

$$E(X) = \int_a^b xf(x)dx$$

The following example calculates the average speed between 30miles/hour and 40 miles/hour (Poonthalir and Nadaraja, 2018):

$$E(X) = \int_{30}^{40} xf(x)dx$$

$$E(X) = \int_{30}^{37} x\frac{2(x-30)}{(40-30)(37-30)}dx + \int_{37}^{40} x\frac{2(40-x)}{(40-30)(40-37)}dx$$

$$E(X) = 32 \text{ miles/gallon}$$

The previous example shows the average speed between a minimum speed limit $a = 30$ and a maximum speed limit $b = 40$ and 37 be the most likely speed limit (Poonthalir and Nadaraja, 2018).

The approach proposed in this paper consists of three-stages; the first stage aims to determine the packages (routes) that caregivers perform with taking into consideration several constraints. In the second and third stage, we assign the packages to the suitable caregivers and balance the workload.

3.1 Mathematical modeling

3.1.1 First stage

We first propose the following multi-objective model that aims to determine the packages on one period and considers minimizing both distance and fuel

consumption. We assume that patients cannot be assigned to all packages; using this technique will assure the continuity of care in the approach.

We consider a complete directed network $G = (I, E)$ having I nodes corresponding to the cares required by the patients, plus an extra node (node 1), which is used to denote where the caregivers start their tour from node 1 and arrive in node1.

3.1.1.1 Parameters:

$\boldsymbol{K}$**:** Set of packages
$\boldsymbol{I}$: Set of cares
$\boldsymbol{NAP_i}$**:** Set of the unavailable packages for care i (The packages that care i cannot be assigned to)
$\mathbf{s_i}$: Service time at care i
$\mathbf{t_{ij}}$**:** Traveling time from node i to nodej, $(i, j) \in E$
$[\mathbf{A_i}, \mathbf{B_i}]$**:** Respectively the earliest and the latest service time for the care i (related to the time window of the patient required care i)
$\boldsymbol{S}$: Set of cares that require two caregivers ($S \subset K$)
$\mathbf{MAXWL_k}$: The maximum daily workload for the package k
$\boldsymbol{\delta_i}$**:** The ratio of time decreased from care time s_i of care i this ratio define the learning care
M: A high value
$\boldsymbol{F}$: Maximum fuel capacity
$\boldsymbol{ord_i}$: Order of precedence of care i (if care i has to be planned before care j we have $ord_i \geq ord_j$)
$\boldsymbol{I_i}$: One if the care i requires one caregiver. Two if the care requires two caregivers
$\boldsymbol{dis_{ij}}$: Distance between node i and j
$\boldsymbol{sp_{ij}}$**:** Average expected speed between i and j calculated using the triangular distribution (Miles/hour)
mpg: The total miles travelled per gallon (Miles/Gallon)
$\boldsymbol{FCGH_{ij}}$: Fuel consumption in gallons per hour between nodes i and j (Gallon/hour) ($\boldsymbol{FCGH_{ij}} = \frac{\boldsymbol{sp_{ij}}}{\mathbf{mpg}}$)

3.1.1.2 Decision variable

$$\mathbf{x_{ijk}} = \begin{cases} 1 \text{ if the care j is assigned after care j in the package k} \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases}$$

$$\mathbf{y_{ik}} = \begin{cases} 1 \text{ if the care i is assigned to the package k} \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases}$$

$\mathbf{AT_{ik}}$**:** Arrival time of the package k to the node i

$\mathbf{RT_{ik}}$**:** Remaining time at node i of package k (Time left for package k at node i)

$\mathbf{f_{jk}}$: Remaining fuel at node j of package k

3.1.1.3 Multi-objective programming model

Objective function:

$$\text{minimize } \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} x_{ijk} dis_{ij} \quad (1)$$

$$\text{minimize } \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} x_{ijk} \frac{dis_{ij}}{sp_{ij}} FCGH_{ij} \quad (2)$$

Constraints:

$$\sum_{k\in K} y_{jk} = I_j \qquad \forall j \in I|\, j \neq 1 \qquad (3)$$

$$\sum_{j\in I|\, j\neq 1} x_{1jk} \leq 1 \qquad \forall k \in K \qquad (4)$$

$$\sum_{j\in I|\, j\neq 1} x_{j1k} \leq 1 \qquad \forall k \in K \qquad (5)$$

$$\sum_{k\in NAP_i} y_{ik} = 0 \qquad \forall i \in I|\, i \neq 1 \qquad (6)$$

$$y_{jk} = \sum_{i\in I|\, i\neq j} x_{ijk} \qquad \forall k \in K,\ \forall j \in I|\, j \neq 1 \qquad (7)$$

$$\sum_{i\in I} x_{ijk} = \sum_{i\in I} x_{jik} \qquad \forall k \in K,\ \forall j \in I|\, j \neq 1 \qquad (8)$$

$$AT_{jk} \geq A_j \qquad \forall k \in K,\ \forall j \in I|\, j \neq 1 \qquad (9)$$

$$AT_{jk} \leq B_j \qquad \forall k \in K,\ \forall j \in I|\, j \neq 1 \qquad (10)$$

$$f_{jk} \leq f_{ik} - \frac{dis_{ij}}{sp_{ij}}\frac{sp_{ij}}{mpg}x_{ijk} + (1 - x_{ijk})F \qquad \forall k \in K,\ \forall (i,j) \in E|\, j \neq 1 \qquad (11)$$

$$\sum_{(i,j)\in E} ((s_i(1-\delta_i)) + t_{ij})x_{ijk} \leq MAXWL_k \qquad \forall k \in K \qquad (12)$$

$$AT_{jk} \geq AT_{ik} + \left((s_i(1-\delta_i)) + t_{ij}\right)x_{ijk} - (1 - x_{ijk})M \qquad \forall k \in K,\ \forall (i,j) \in E|\, j \neq 1 \qquad (13)$$

$$f_{1k} = F \qquad \forall k \in K \qquad (14)$$

$$AT_{jk} = AT_{jk}' \qquad \forall k, k' \in K,\ \forall j \in S \qquad (15)$$

$$RT_{1k} = MAXWL_k \qquad \forall k \in K \qquad (16)$$

$$ord_i \geq ord_j \times x_{ijk} \qquad \forall k \in K,\ \forall (i,j) \in E|\, (i,j) \neq 1 \qquad (17)$$

$$RT_{jk} \leq RT_{ik} - \left((s_i(1-\delta_i)) + t_{ij}\right)x_{ijk} + (1 - x_{ijk})M \qquad \forall k \in K,\ \forall (i,j) \in E|\, j \neq 1 \qquad (18)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\},\ y_{ik} \in \{0,1\},\ AT_{ik} \geq 0,\ RT_{ik} \geq 0,\ f_{ik} \geq 0 \qquad \forall k \in K,\ \forall (i,j) \in E \qquad (19)$$

Objective (1) aims to minimize travel distance. Objective (2) aims to minimize fuel consumption. Constraints (3) guarantee the number of caregivers that a care needs. Constraints (4) ensure that at most one care can be performed after the fictive care 1. Constraints (5) ensure that at most one care can be performed before the fictive care 1. Constraints (6) guarantee restriction of package for cares (This will assure the continuity of care in the planning). Constraints (7) guarantee that if a care is assigned to a caregiver, the care has a successor (Linking between routing and assignment variables). Constraints (8) are the classical flow conservation constraints on the routing variables. Constraints (9) and (10) ensure that the start time of the cares respect a time window. Constraints (11) gives the remaining fuel level at nodes based on the distance between i and j and the average expected speed between i and j. Constraints (12) assure that the workload of each caregiver in each day, expressed as the sum of the service times and traveling times does not exceed the duration of a workday. Constraints (13) calculate the arrival time of the package to the care. Constraints (14) ensure that the fuel level reaches its maximum capacity depot. Constraints (15) ensure that the care must be start at the same time for cares that require synchronization (needs two caregivers). Constraints (16) ensure that the workload of packages reaches its maximum at the depot. Constraints (17) guarantee the precedence of cares. Constraints (18) give the remaining time at nodes based on the travel time between i and j and the service time. The decision variables of the problem are given in constraints (19).

3.1.1.4 Weighted sum approach for multi-objective optimization

One of the most popular techniques to solve multi-objective optimization problems is the weighted linear aggregation. The problem becomes a single objective. This single objective function is considered as a sum of objective functions multiplied by weighting coefficients. The model is transformed into a mixed integer linear programming model and described as:

$$\boldsymbol{minimize\ \gamma = \alpha \times F_1 + \beta \times F_2}$$

Subject to:

(3)- (19)

Where,

$\boldsymbol{F_1} = \sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in P_k} x_{ijk} \times dis_{ij}$ And,

$\boldsymbol{F_2} = \sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in P_k} x_{ijk} \times \frac{dis_{ij}}{sp_{ij}} \times FCGH_{ij}$

The normalization of objectives is required to get a consistent optimal solution (Grodzevich et al., 2006).

$\boldsymbol{\alpha = \rho_1 \times \theta_1}$, and $\boldsymbol{\beta = \rho_2 \times \theta_2}$ where $(\boldsymbol{\rho_1 + \rho_2 = 1})$

The normalization factor is calculated as follows:
Where $\boldsymbol{\theta_1 = \frac{1}{\min\{F_1\}}}$ and $\boldsymbol{\theta_2 = \frac{1}{\min\{F_2\}}}$
$\boldsymbol{\min\{F_1\}}$, $\boldsymbol{\min\{F_2\}}$ are respectively the minimum of $\boldsymbol{F_1}$and $\boldsymbol{F_2}$
The decision maker chooses the weights $\boldsymbol{\rho_1}$and $\boldsymbol{\rho_2}$ according to the importance of each objective function.
Since the problem is multi-objective, we can get a set of optimal solutions from the Pareto Front. The weighted sum approach ensures finding points on the Pareto front by varying each time the weights $\boldsymbol{\rho_1}$and $\boldsymbol{\rho_2}$ and solving the model (En-nahli et al., 2015).

3.1.2 Second Stage

In the second stage, we define a "category"; which is group of packages of first stage that contains the same patients in the planning horizon. To define the number of caregivers required in each category, we fix the day with the maximum number of packages that a category requires.
The number of categories is limited, due to the limited number of packages that a patient can be assigned to (the continuity of care constraint).
To decide the caregivers to assign to each category, and according to the affinity and the skill required by the patients, we propose the following heuristic:

Heuristic.1

Input - **SC**: Set of categories
- **N**: Set of caregivers
- **Aff**: Affinity between the caregiver and the patients
- **SK** : Skill of the caregiver
- **SR**: Skill required by the patients

For all i in SC
while (the number of caregivers required by the category isn't reached)
X : $a = rand(N)$ (Choosing randomly a caregiver)
if (SR(patients(i))≤ SK(a) & Aff(patients(i),a)≠0 & a has never been assigned)
Assign $a \rightarrow i$
else go to **X**

Heuristic1 is proposed to assign the caregivers to the suitable categories according to the affinity between the patients and the caregivers, as well as, the skills required by the patients.
In the following stage, we aim to assign the caregivers to each package and to balance the weekly workload.

3.1.3 Third Stage

In this level of the approach, we focus on the caregivers assigned to each category and balance their weekly workloads.

3.1.3.1 Parameters

N: Set of caregivers
K: Set of packages
D: Set of days in the planning horizon
$\mathbf{WL_n}$: Workload of package n
$\boldsymbol{P_{jd}}$: 1 if package j is in day d, 0 otherwise.

3.1.3.2 Decision variables

$$\mathbf{z_{jnd}} = \begin{cases} 1 \text{ if the package j is assigned to the caregiver n on day d} \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases}$$

L : The minimal operability factor of the caregiver that we aim to maximize in order to ensure a fairness workload
$\mathbf{L_n}$ **:** The operability of the caregiver n during the planning horizon, given by the following formula:

$$\frac{\sum_{d\in D}\sum_{j\in J}\mathbf{z_{jnd}}}{|D| \times WL_n} = L_n \quad \forall n \in N$$

***Objective function*:**

$$maximize\ L \tag{20}$$

Constraints:

$$L_n \geq L \qquad \forall n \in N \tag{21}$$

$$\sum_{n\in N} z_{jnd} \leq P_{jd} \qquad \forall j \in K, \forall d \in D \tag{22}$$

$$\sum_{d\in D}\sum_{j\in K} z_{jnd} \leq 1 \qquad \forall n \in N \tag{23}$$

Objective (20) aims to balance workload. Constraints (21) ensure that the workload of each caregiver is greater than the operability factor that we aim to maximize; it guarantees a fair workload for all caregivers and avoids solutions where a given caregiver has a workload less than others. Constraints (22) guarantee that the packages are assigned to the days given by the first stage model. Constraints (23) ensure that a caregiver is assigned to at most one package during a day.

4 COMPUTATIONAL EXPERIENCE

The model is implemented using CPLEX Optimization Studio12.6, in an Intel® Core™ i5 and 6 Go Ram. The heuristic.1 is implemented using C++. We have generated various instances to show the performance of the approach introduced for small and medium instances.

4.1 Data generation:

We have generated patients and caregivers' instances as shown in Table.1.
P.X.C.Y denotes an instance with **X** patients and **Y** caregiver.

Instances	Caregivers	Patients
1	4	12
2	10	24
3	15	48
4	18	60

Table.1 Instances

The duration of time windows of patients' availability varies between 90min and 180min. The considered skills required by the patients vary between 1 (usual cares) and 3 (advanced cares).
Caregivers who have "skill 3" can treat all cares. Caregivers with "skill 2" can treat patients requiring skill 2 and 1. The patients may need several cares per day: one, two, or three. Some patients do not need any care on a day. The cares have an order that must be taken into account, (+) denotes that the patient requires the care, (-) otherwise. (SYN) is the synchronization of cares; it denotes that the cares require two caregivers at the same time. The following Table.2 shows the care required by the patient on a day for instance (P.12.C.4).

	Care α	Care β	Care γ
P1	(before γ) +	-	+
P2	-	SYN +	-
P3	+	-	-
P4	(after β) +	SYN+	-
P5	-	-	-
P6	+	-	-
P7	(before γ) +	-	+
P8	-	-	+
P9	-	SYN (after γ)+	+
P10	-	-	-
P11	+	-	-
P12	-	-	+

Table.2 Data of cares required by patients on a day for Instance (P.12.C.4)

As mentioned in Section 2. Generally, the speed of the vehicle fluctuates between 30 and 60. This range is considered according to the literature (Poonthalir and Nadaraja, 2018). It is taken in an interval of 10 from 30 to 60 as [30 40 50 60].

To calculate the expected speed within the interval 30-60, one has to calculate the average speed within each interval and take the average.

4.2 Computational results:

In the following, we solve the problem using CPLEX optimize studio, let α be route cost and β be the fuel consumption.
Firstly, we take ($\beta = 0$) and minimize α as shown in column 2 of Table 3. Then, we take ($\alpha = 0$) and minimize β with constant and varying speed (column 3 and 5 of Table 3). The learning care factor is ($\delta = 0$).

Instance	Route traveled distance (Miles) ($\beta = 0$)	Fuel consump sumption with constant speed (Gallon) ($\alpha = 0$)	Speed	Fuel consumption with varying speed (Gallon) ($\alpha = 0$)	Speed
P.12.C.4	11.21	1.86	40	1.77	39.25
P.24.C.10	22.796	3.77	40	2.77	41.29
P.48.C.15	37.19	6.28	40	5.78	40.02
P.60.C.18	45.36	6.98	40	5.01	37.55

Table.3 Fuel consumption with varying and constant speed

Table 3 shows the results obtained with varying and constant speed. We obtain a decrease in the fuel consumption when varying speed is used. Hence, the dioxide emission is decreased.
Secondly, we solve the problem using the weighted sum and normalization approach described in Section 3, we take $\boldsymbol{\rho_1}$=0.5 and $\boldsymbol{\rho_2}$=0.5.

Instance	Cost with constant speed	Cost with varying speed
P.12.C.4. δ.0.2	1.073242	1.06963
P.24.C.10. δ.0.4	1.09705	1.052
P.48.C.15. δ.0.4	1.0073	0.893
P.60.C.18. δ.0	0.9958	0.801

Table.4 Results of the weighted sum approach

In Table 4 the problem is solved using the weighted sum and normalization approach. The learning care factor takes ($\delta = 0,\ \delta = 0.2\ and\ \delta = 0.4$).
The instance P.12.C.4. δ.0 denotes 12 patients and 4 caregivers with leaning factor δ =0.
Experimental results show the decrease in fuel consumption when varying speed.
The weighted sum approach ensures finding points from the Pareto Front by varying the weights and solving the problem.

5 CONCLUSION

In this paper, we introduced a fuel consumption approach with varying speed constraints to solve the GHHC problem. We presented a literature review of the works related to the HHC. A three-stage methodology composed of a multi-objective programming model, a heuristic, and an ILP model is introduced to solve the multi-period GHHC considering several constraints and criteria that make the problem more challenging to solve. We are working on a GHHC problem-solving approach based on a multi-objective Genetic Algorithm.

REFERENCES

Benzarti, E., 2012. *Home health care operations management: Applying the districting approach to Home Health Care.* Ph.D. thesis, Ecole Centrale Paris.

Bertels, S., and T. Fahle, 2006. A hybrid setup for a hybrid scenario: combining heuristics for the home health care problem. *Computers and Operations Research*, 33, p. 2866-2890.

Cappanera, S. and MG. Scutellà, 2015. Joint assignment, scheduling, and routing models to home care optimization: A pattern-based approach. *Transp. Sci*, 49(4), p. 830-852.

Cissé, M., S. Yalçındağ, Y, Kergosien, E, Şahin, C, Lenté and A. Matta, 2017. OR problems related to Home Health Care: A review of relevant routing and scheduling problems. Operations Research for Health Care, 13, p. 1-22.

En-nahli, L., H. Allaoui, and I. Nouaouri, 2015. A multi-objective modelling to human resource assignment and routing problem for home health care services. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, p. 698-703.

Erdogan, S. and E. Miller-Hooks, 2012. A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), p. 100-114.

Fathollahi-Fard, AM., K. Govindan, M. Hajiaghaei-Keshteli, and A. Ahmadi, 2019. A green home health care supply chain: New modified simulated annealing algorithms. *Journal of Cleaner Production,* 240.

Fathollahi-Fard, AM., M. Hajiaghaei-Keshteli, and R. Tavakkoli-Moghaddam, 2018. A bi-objective green home health care routing problem. *Journal of Cleaner Production*, 200, p. 423-443.

Fikar, C., and P. Hirsch, 2017. Home health care routing and scheduling: A review. Computers & Operations Research, 77, p. 86-95.

Grodzevich, O., and O. Romanko, 2006. Normalization and Other Topics in Multi-Objective Optimization. *Proceedings of the Fields–MITACS Industrial Problems Workshop*, p. 89-101.

Hmke, J.F., AM. Campbell, and TL Urban, 2015. Ensuring service levels in routing problems with time windows and stochastic travel times. *European Journal of Operational Research,* 240(2), p. 539-550.

Kergosien, Y., C. Lente, and JC Billaut, 2009. Home health care problem: An extended multiple traveling salesman problem. *4th Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Applications (MISTA09),* Dublin (Irlande), p. 85-92.

Lanzarone, E., A. Matta, and E. Sahin, 2012. Operations management applied to home care services: The problem of assigning human resources to patients. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.-Part A: Syst. Hum*, vol. 42, no. 6, p. 1346-1363.

Lanzarone, E. and A. Matta, 2012. A cost assignment policy for home care patients. *Flex Serv Manuf J,* 24, p. 465-495.

Moussavi, S.E., M. Mahdjoub, and O. Grunder, 2019. A matheuristic approach to the integration of worker assignment and vehicle routing problems: Application to home healthcare scheduling. *Expert Systems with Applications*, 125, p. 317-332.

Moussavi, S.-E., M. Mahdjoub, and O. Grunder, 2017. Productivity improvement through a sequencing generalized assignment in an assembly line system. *International Journal of Production Research*, p. 1-15.

Poonthalir G. and R. Nadarajan, 2018. A Fuel Efficient Green Vehicle Routing Problem with varying speed constraint (F-GVRP). *Expert Systems With Applications*, 100, p. 131-144.

Shi, Y., T. Boudouh, and O. Grunder, 2017. A hybrid genetic algorithm for a home health care routing problem with time window and fuzzy demand. *Expert Systems with Applications*, 72, p. 160-176.

13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation - MOSIM'20 - 12 au 14 novembre 2020
Agadir - Maroc "Nouvelles avancées et défis pour des industries durables et avisées"

Fouille de données et segmentation de chroniques par extrema : considérations préliminaires

Data mining and time series segmentation via extrema: preliminary investigations

Michel Fliess

LIX (CNRS, UMR 7161)
École polytechnique
91128 Palaiseau - France
Michel.Fliess@polytechnique.edu

Cédric Join

CRAN (CNRS, UMR 7039)
Université de Lorraine, BP 239
54506 Vandœuvre-lès-Nancy - France
Cedric.Join@univ-lorraine.fr

AL.I.E.N.
7 rue Maurice Barrès
54330 Vézelise - France
{michel.fliess, cedric.join}@alien-sas.com

RÉSUMÉ : *La segmentation des chroniques est l'un des outils de fouilles des donnés. On l'aborde, ici, en prenant des extrema locaux pour points d'importance perceptuelle (PIP). Un théorème de décomposition additive des chroniques, dû à Cartier et Perrin, et des techniques algébriques d'estimation des dérivées, déjà utiles en automatique et signal, permettent d'évacuer le brouillage dû aux fluctuations rapides de toute chronique. Des illustrations numériques valident notre approche et soulignent l'importance du choix du seuil de détection.*
ABSTRACT: *Time series segmentation is one of the many data mining tools. We take here local extrema as perceptually interesting points (PIPs). The blurring of those PIPs by the quick fluctuations around any time series is treated via an additive decomposition theorem, due to Cartier and Perrin, and algebraic estimation techniques, which are already useful in automatic control and signal processing. Our approach is validated by several computer illustrations. They underline the importance of the choice of a threshold for the extrema detection.*

MOTS-CLÉS : *chroniques, segmentation, point d'importance perceptuelle (PIP), estimation algébrique.*
KEYWORDS: *time series, segmentation, perceptually important points (PIPs), algebraic estimation.*

1 Introduction

Les chroniques, ou « time series », sont omniprésentes dans la fouille de données, ou « data mining ». Parmi les multiples méthodes utilisées, on privilégie ici la *segmentation* (voir, par exemple, Abonyi et Feil (2007); Cho et Fryzlewicz (2012); Durán-Rosal et al. (2018a,b, 2019); Esling et Agon (2012); Keogh et al. (2004); Kim et al. (2019); Lee et al. (2018); Liu et al. (2008); Lu et Huang (2020); Martí et al. (2014)), c'est-à-dire une approximation par un nombre fini de segments de droite. De nombreuses études concrètes l'ont déjà utilisée dans des domaines variés : hydrométéorologie (Hubert et al. (1989)), économie (Cheong et al. (2012), finance (Wan et al. (2016); Wan et Si (2017)), mouvement animal (Edelhoff et al. (2016), vision par ordinateur (Liu et al. (2019)), efficacité énergétique des machines outils (Seevers et al. (2019)), collecte de données par drones aquatiques (Castellini et al. (2020)), ... Prendre pour bouts des segments des *points d'importance perceptuelle* (*PIP*), ou « *perceptually important points* », consolide ce point de vue (voir, par exemple, Fu (2011); Fu et al. (2017)), qui l'est encore davantage si ces PIP sont des extrema locaux (Pratt et Fink (2002); Fink et Pratt (2004); Fink et Gandhi (2011); Yin et al. (2011)). La détection des PIP est brouillée par les fluctuations rapides de toute chronique. Comment isoler des extrema locaux sur la ligne bleue de la figure 1 ? Les publications existantes ignorent, semble-t-il, cette difficulté majeure. Cet article présente un cadre mathématique et algorithmique afin de détecter ces extrema locaux en dépit des oscillations. Quelques exemples académiques sur la réduction de dimension, préalable à toute fouille de données, illustrent notre propos.

Notre approche des chroniques, qui s'appuie sur (Fliess et al. (2018)), consacré à la prévision et à la gestion du risque pour l'énergie photovoltaïque, est née en ingénierie financière (Fliess et Join (2009); Fliess et al. (2011)). Elle a été utilisée pour la prévision du trafic autoroutier (Abouaïssa et al. (2016)) et des ressources nécessaires en informatique nuagique, ou « cloud computing » (Fliess et al. (2019)). Le pivot en est un théorème dû à Cartier et Perrin (1995) : toute chronique X satisfaisant une hypothèse très

lâche, s'écrit $X = E(x) + X_{\text{fluctuat}}$, où $E(x)$ est la *moyenne*, ou *tendance* (« *trend* »), et X_{fluctuat} les fluctuations rapides autour de 0. La ligne rouge de la figure 1 correspond à la moyenne. Le théorème de Cartier et Perrin s'exprime dans le langage de l'*analyse non standard*, introduit par Robinson (1996) et outil merveilleux pour l'intuition (voir, par exemple, Lobry et Sari (2008)). On ne recherche pas les extrema sur X, mais sur $E(X)$, plus lisse. La détection d'un extremum est liée à l'annulation de la dérivée d'ordre 1. On y parvient grâce aux techniques d'*estimation algébrique* (Fliess et al. (2008); Mboup et al. (2009)) pour traiter du cas bruité, connu comme important et difficile (Lanczos (1956)). Si la dérivée est proche de 0 durant un certain temps, la chronique est remplacée par un plateau, c'est-à-dire un segment horizontal. Des techniques algébriques analogues ont déjà été employées pour détecter des ruptures, ou « change-points »(Fliess et al. (2010)).

Cette communication est organisée comme suit. Les rappels du § 2 sont consacrés aux chroniques et à l'estimation algébrique. On présente au § 3 des illustrations numériques, qui soulignent l'importance du seuil de détection des extrema. Quelques prolongements sont proposés au § 4.

2 Rappels sur les chroniques et l'estimation algébrique

2.1 Chroniques et analyse non standard

L'*analyse non standard*, qui repose sur la logique mathématique, fournit un sens précis aux notions d'infiniment petit et d'infiniment grand. On recommande la présentation par Nelson (1977) (voir aussi Nelson (1987), Diener et Diener (1995); Diener et Reeb (1989)), conceptuellement plus simple.

Soit l'intervalle $[0, 1]$, avec échantillonnage infinitésimal, comme souvent en analyse non standard,

$$\mathfrak{T} = \{0 = t_0 < t_1 < \cdots < t_\nu = 1\}$$

où $t_{i+1} - t_i$, $0 \leq i < \nu$, est *infinitésimal*, c'est-à-dire très petit.

Remarque 2.1 *Les notions d'infiniment petit ou grand sont des idéalisations mathématiques. On doit considérer, en pratique, un laps de temps d'une seconde (resp. heure) comme très petit par rapport à une heure (resp. mois). C'est pourquoi l'analyse non standard s'applique au monde réel.*

Une chronique X est une fonction $\mathfrak{T} \to \mathbb{R}$. La *mesure de Lebesgue* sur $\mathfrak{T}$ est la fonction ℓ définie sur $\mathfrak{T}\backslash\{1\}$ par $\ell(t_i) = t_{i+1} - t_i$. La mesure de tout intervalle $[c, d] \subset \mathfrak{T}$, $c \leq d$, est sa longueur $d - c$. L'*intégrale* sur $[c, d]$ de la chronique $X(t)$ s'écrit

$$\int_{[c,d]} X d\tau = \sum_{t \in [c,d]} X(t)\ell(t)$$

X est *S-integrable* si, et seulement si, l'intégrale $\int_{[c,d]} |X| d\tau$ est *limitée*, c'est-à-dire non infiniment grande, et, si $d - c$ is infinitésimal, $\int_{[c,d]} |X| d\tau$ l'est aussi. X est *S-continue* en $t_\iota \in \mathfrak{T}$ si, et seulement si, $f(t_\iota) \simeq f(\tau)$ quand $t_\iota \simeq \tau$ (on écrit $a \simeq b$ si $a - b$ est infinitésimal). X est *presque continue* si, et seulement si, elle est S-continue sur $\mathfrak{T} \setminus R$, où l'ensemble R est *rare*[1]. X est *Lebesgue intégrable* si, et seulement si, elle est S-intégrable et presque continue.

La chronique X est *rapidement fluctuante*, ou *oscillante*, autour de 0, si, et seulement si, elle est

- S-intégrable,
- $\int_A \mathcal{X} d\tau$ est infinitésimal pour ensemble *quadrable*[2].

Théorème de Cartier-Perrin : Si la chronique X est S-intégrable, il y a décomposition additive[3] (Cartier et Perrin (1995)) :

$$\boxed{X(t) = E(X)(t) + X_{\text{fluctuat}}(t)} \tag{1}$$

où

- la *moyenne* $E(X)(t)$ est Lebesgue-intégrable,
- $X_{\text{fluctuat}}(t)$ est rapidement fluctuante.

La décomposition (1) est unique à une quantité additive infinitésimale près.

Remarque 2.2 *Cette moyenne, ou* tendance*, souvent désignée par le mot anglais « trend », est à rapprocher du lissage par* moyenne glissante *ou « moving average » (voir, par exemple, Mélard (2008)). On la retrouve aussi en* analyse technique *(voir, par exemple, Béchu et al. (2014); Kirkpatrick et Dahlquist (2016); Tsinaslanidis et Zapranis (2016)), branche de l'ingénierie financière. Très différent est le sens habituel de* trend *dans la littérature sur les chroniques (voir, par exemple, Enders (2014)).*

2.2 Estimation algébrique des dérivées

Le § 2.1 démontre que l'on peut passer au continu si les données sont en nombre suffisant et la période d'échantillonnage petite. La dérivée est, en fait, estimée sur la moyenne et non sur les données brutes.

Soit la fonction polynômiale de degré 1

$$p_1(t) = a_0 + a_1 t, \quad t \geq 0, \quad a_0, a_1 \in \mathbb{R}$$

1. R est *rare* (Cartier et Perrin (1995)) si, pour tout réel standard $\alpha > 0$, il existe un ensemble interne $A \supset R$ tel que $\ell(A) \leq \alpha$.
2. Un ensemble est *quadrable* (Cartier et Perrin (1995)) si sa frontière est rare.
3. Voir Lobry et Sari (2008) pour une présentation plus abordable

Le calcul opérationnel classique (voir, par exemple, Yosida (1984)) permet de réécrire p_1

$$P_1 = \frac{a_0}{s} + \frac{a_1}{s^2}$$

D'où en multipliant par s^2

$$s^2 P_1 = a_0 s + a_1 \tag{2}$$

et en dérivant par rapport à s, qui, dans le domaine temporel, correspond à la multiplication par $-t$:

$$s^2 \frac{dP_1}{ds} + 2sP_1 = a_0 \tag{3}$$

Le système triangulaire (2)-(3) d'équations fournit a_0, a_1. On se débarrasse de sP_1, s^2P_1, an $s^2\frac{dP_1}{ds}$, c'est-à-dire, dans le domaine temporel, des dérivées par rapport au temps, en multipliant les deux membres des équations (2) et (3) par s^{-n}, $n \geq 2$. Les intégrales itérées correspondantes, qui, en pratique, sont remplacées par des filtres linéaires numériques, sont des filtres passe-bas : elles atténuent les oscillations parasites. Une fenêtre temporelle courte suffit pour estimer avec précision a_0, a_1.

La généralisation aux polynômes de degré supérieur est évidente, donc aussi celle aux développements de Taylor tronqués. Renvoyons à Mboup et al. (2009) pour plus de détails.

Remarque 2.3 *Les manipulations algébriques précédentes sont employées avec succès en ingénierie (voir, par exemple, Sira-Ramírez et al. (2013)). Le passage en* 0 *de la dérivée première a été utilisée, en particulier, en traitement du signal (Fedele et al. (2009)).*

3 Illustrations

3.1 Polynômes par morceaux

Soit $y(t)$ défini par

$$\begin{cases} y(t) = -10t + 0.50 \quad 0 \leq t < 10 \\ y(t) = 5t - 99.5 \quad 10 \leq t < 20 \\ y(t) = -49.5 \quad 20 \leq t < 25 \\ y(t) = t^2 - 49.5 \quad 25 \leq t < 35 \\ y(t) = 50.5 \quad 35 \leq t \leq 45 \end{cases}$$

altéré par un bruit uniformément réparti entre -5 et 5. Soit 0.1s la période d'échantillonnage. La segmentation obtenue est présentée figure 2-(a). L'estimation de dérivée l'est, selon le § 2.2, avec un polynôme de degré 2 sur une fenêtre de 40 échantillons. La figure 2-(b) en atteste la qualité. On note la détection des plateaux. La segmentation est peu représentative durant la branche parabolique, de courte durée heureusement [4].

4. Voir, à ce sujet, le point 1 du § 4.

3.2 Sinusoïdes

Soient deux sinusoïdes de fréquences 5s et 30s, échantillonnées toutes les 0.01s (voir figures 3-(a) et 4-(a)). Elles sont altérées par un bruit uniformément réparti entre -0.25 et 0.25. La dérivée est estimée avec un polynôme de degré 2, sur une fenêtre glissante de durée 2s. On détecte les extrema avec un seuil égal à 0.2 (voir figures 3-(b) et 4-(b)). Avec la petite fréquence, ce seuillage conduit à un plateau (figures 4-(c) & 4-(d)), mais pas avec la grande (figures 3-(c) & 3-(d)).

3.3 CAC 40

On reprend, pour la segmenter, la chronique du CAC 40, représentée par la figure 1. Avec des seuils différents, 1 et 5, pour détecter les passages par zéro de la dérivée, on modifie notablement les résultats (figures 5-(c) et 6-(c)).

4 Conclusion

1. On examinera d'autres poins d'importance perceptuelle, comme ceux de courbure localement maximale (voir, déjà, Join et Tabbone (2008)).
2. Aux chroniques multivariées correspondent des courbes gauches, c'est-à-dire non planes. Le choix des PIP exige une étude géométrique plus délicate (voir, par exemple, Cagnac et al. (1971)). L'analyse technique, qui examine, souvent, prix et volumes (Béchu et al. (2014); Kirkpatrick et Dahlquist (2016); Tsinaslanidis et Zapranis (2016)), y gagnerait certainement [5].
3. Des applications véritables sont en cours d'étude, la reconnaissance de signatures entre autres. Plusieurs publications proposent, déjà, des techniques diverses d'analyse des chroniques (voir, par exemple, Henniger et al. (2014); Hsu et al. (2015)). Nos premiers résultats démontent l'inanité de rechercher mesures ou distances universelles de similarité, c'est-à-dire indépendantes du but poursuivi.

5. Certains liens entre analyse technique, PIP et segmentation des chroniques ont déjà été entrevus (voir, par exemple, Tsinaslanidis et Zapranis (2016); Wan et al. (2016); Wan et Si (2017); Yin et al. (2011)).

Références

Abonyi, J., Feil, B. (2007) : Cluster Analysis for Data Mining and System Identification. Birkhäuser.

Abouaïssa, H., Fliess, M., Join, C. (2016) : On short-term traffic flow forecasting and its reliability. In: 8th IFAC Conf. Manufac. Model. Manag. Contr., Troyes. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01275311/en/

Béchu, T., Bertrand, E. Nebenzahl, J. (2014) : L'analyse technique (7^e éd.). Economica.

Cagnac, G., Ramis, E., Commeau, J. (1971) : Traité de mathématiques spéciales, t. 4. Masson.

Cartier, P., Perrin, Y. (1995) : Integration over finite sets. In: Diener, F., Diener, M. (eds.) Nonstandard Analysis in Practice, pp. 195-204. Springer.

Castellini, A., Bicego, M., Masillo, F., Zuccotto, M., Farinelli, A. (2020) : Time series segmentation for state-model generation of autonomous aquatic drones : A systematic framework. Engin. Appli. Artific. Intell. **90**, 103499.

Cheong, S.A., Fornia, R.P., Hui Ting Lee, G., Liang Kok, J., Shyr Yim, W., Yuan Xu, D., Zhang, Y. (2012) : The Japanese economy in crises: A time series segmentation study. Econom.: The Open-Access Open-Assess. E-J. **6**. http://dx.doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2012-5

Cho, H., Fryzlewicz, P. (2012) : Multiscale and multilevel technique for consistent segmentation of nonstationary time series. Stat. Sinica **22**, 207-229.

Diener, F., Diener, M. (1995) : Tutorial. In: Diener, F., Diener, M. (eds.) Nonstandard Analysis in Practice, pp. 1-21. Springer.

Diener, F., Reeb, G. (1989) : Analyse non standard. Hermann.

Durán-Rosal, A.M., Gutiérrez, P.A., Martínez-Estudillo, F.J., Hérvas-Martínez, C. (2018a) : Simultaneous optimisation of clustering quality and approximation error for time series segmentation. Informat. Sci. **442-443**, 186–201.

Durán-Rosal, A.M., Gutiérrez, P.A., Salcedo-Sanz, S., Hérvas-Martínez, C. (2018b) : A statistically-driven Coral Reef Optimization algorithm for optimal size reduction of time series. Appl. Soft Comput. **63**, 139-153.

Durán-Rosal, A.M., Gutiérrez, P.A., Carmona-Poyato, Á, César Hervás-Martínez, C. (2019) : A hybrid dynamic exploitation barebones particle swarm optimisation algorithm for time series segmentation. Neurocomput. **353**, 45-55.

Edelhoff, H., Signer, J., Balkenhol, N. (2016) : Path segmentation for beginners: an overview of current methods for detecting changes in animal movement patterns. Mov. Ecol. **4**, 21. https://doi.org/10.1186/s40462-016-0086-5

Esling, P., Agon, C. (2012) : Time-series data mining. ACM Comput. Surv. **45**, article 12, 34 pages.

Enders, W. (2014) : Applied Econometric Time Series (4th ed.). Wiley.

Fedele, G., Chiaravallotri, F., Join, C. (2009) : An algebraic derivative-based approach for the zero-crossings estimation. In: 17th Europ. Sign. Proc. Conf., Glasgow. https://hal.inria.fr/inria-00389872/en/

Fink, E., Pratt, K.B. (2004) : Indexing of compressed time series. In: Last, M., Kandel, A., Bunke, H. (eds) Data Mining in Time Series Databases, pp. 43-65. World Scientific.

Fink, E., Gandhi, H.S. (2011) : Compression of time series by extracting major extrema. J. Exper. Theoret. Artif. Intell. **23**, 255-270.

Fliess, M. (2006) : Analyse non standard du bruit. C.R. Acad. Sci. Paris **342**, 797–802.

Fliess, M., Join, C. (2009) : A mathematical proof of the existence of trends in financial time series. In: El Jai, A., Afifi, L., Zerrik, E. (Eds.): Systems Theory: Modeling, Analysis and Control. Presses Universitaires de Perpignan, pp. 43-62. https://hal.inria.fr/inria-00352834/en/

Fliess, M., Join, C., Bekcheva, M., Moradi, A., Mounier, H. (2019) : Easily implementable time series forecasting techniques for resource provisioning in cloud computing. In: 6th Int. Conf. Contr. Dec. Inform. Techno., Paris. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02024835/en/

Fliess, M., Join, C., Hatt, F. (2011) : A-t-on vraiment besoin d'un modèle probabiliste en ingénierie financière ? In: Conf. Médit. Ingén. Sûre Syst. Compl., Agadir. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00585152/en/

Fliess, M., Join, C., Mboup, M. (2010) : Algebraic change-point detection. App. Algeb. Engin. Commun. Comput. **21**, 131–143.

Fliess, M., Join, C., Sira-Ramírez, H. (2008) : Nonlinear estimation is easy. Int. J. Model. Identif. Contr. **4**, 12-27.

Fliess, M., Join, C., Voyant, C. (2018) : Prediction bands for solar energy: New short-term time series forecasting techniques. Solar Energy **166**, 519-528.

Fu, T.-C. (2011) : A review on time series data mining. Engin. Appli. Artif. Intell. **24**, 164-181.

Fu, T.-C., Hung, Y.-K., Chung, F.-L. (2017) : Improvement algorithms of perceptually important point identification for time series data mining. In: IEEE 4th Int. Conf. Soft Comput. Mach. Intell.. Port Louis, Mauritius.

Henniger, O., Guest, R., Miguel-Hurtado, O., Kaplan, C. (2014) : Signature/Sign Time Series Data: Standardization. In: Li S., Jain A. (Eds), Encyclopedia of Biometrics, pp. 1395-1400. Springer.

Hsu, Y.-L., Chu, C.-L., Tsai, Y.-J., Wang, J.-S. (2015) : An inertial pen with dynamic time warping recognizer for handwriting and gesture recognition. IEEE Sensors J. **15**, 154-163.

Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chaouche, A. (1989) : Segmentation des séries hydrométéorologiques – Applications à des séries de précipitations et de débit de l'Afrique de l'ouest. J. Hydrol. **110**, 349-367.

Join, C., Tabbone, S. (2008) : Robust curvature extrema detection based on new numerical derivation. In: Blanc-Talon, J., Bourennane, S., Philips, W., Popescu, D., Scheunders, P. (Eds): Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. Lect. Notes Comput. Sci. **5259**, pp. 485-493. Springer.

Keogh, E., Chu, S., Hart, D., Pazzani, M. (2004) : Segmenting time series: A survey and novel approach. In : Last, M., Kandel, A., Bunke, H. (eds), Data Mining in Time Series Databases, pp. 1-21. World Scientific.

Kim, H., Kim, H.K., Kim, M., Park, J. , Cho, S., Im, K.B., Ryu, C.R. (2019) : Representation learning for unsupervised heterogeneous multivariate time series segmentation and its application. Comput. Indust. Engin. **130**, 272-281

Kirkpatrick, C.D., Dahlquist, J. (2016) : Technical Analysis (3rd ed.). Pearson.

Lanczos, C. (1956) : Applied Analysis. Prentice Hall.

Lee, W.-H., Ortiz, J., Ko, B., Lee, R. (2018) : Time series segmentation through automatic feature learning. `arXiv:180.955394`

Lobry, C., Sari, T. (2008) : Nonstandard analysis and representation of reality. Int. J. Contr. **39**, 535-576.

Liu, X., Lin, Z., Wang, H. (2008) : Novel online methods for time series segmentation. IEEE Trans. Knowledg. Data Engin., **20**, 1616-1626.

Liu, J., Wang, C., Liu, Y. (2019) : A novel method for temporal action localization and recognition in untrimmed video based on time series segmentation. IEEE Access **7**, 135204-135209.

Lu, S., Huang, S. (2020) : Segmentation of multivariate industrial time series data based on dynamic latent variable predictability. IEEE Access **8**, 112092-112103.

Martí, L., Sanchez-Pi, N., Molina, J.M., Bicharra Garcia, A.C. (2014) : YASA: Yet another time series segmentation algorithm for anomaly detection in big data problems. In: Polycarpou, M., de Carvalho, A.C.P.L.F., Pan, J.-S., Woźniak, M., Quintián, H., Corchado, E. (Eds.): Hybrid Artificial Intelligence Systems. Lect. Notes Artif. Intel. **8480**, pp. 697-708. Springer.

Mboup, M., Join, C., Fliess, M. (2009) : Numerical differentiation with annihilators in noisy environment. Numer. Algor. **50**, 439-467.

Mélard, G. (2008) : Méthodes de prévision à court terme (2^e éd.). Ellipses & Presses Universitaires de Bruxelles.

Nelson, E. (1977) : Internal set theory: A new approach to nonstandard analysis. Bull. Amer. Math. Soc. **83**, 1165-1198.

Nelson, E. (1987) : Radically Elementary Probability Theory. Princeton University Press.

Pratt, K.B., Fink, E. (2002) : Search for patterns in compressed time series. Int. J. Image Graph. **2**, 89-106.

Robinson, A. (1996) : Non-standard Analysis (revis. ed.). Princeton University Press.

Seevers, J.-P., Johst, J., Weiß, T., Meschede, H., Hessel, J. (2019) : Automatic time series segmentation as the basis for unsupervised, non-intrusive load monitoring of machine tools. Procedia CIRP **81**, 695-700.

Sira-Ramírez, H., García-Rodríguez, C., Cortès-Romero, J., Luviano-Juárez, A. (2013) : Algebraic Identification and Estimation Methods in Feedback Control Systems. Wiley.

Tsinaslanidis, P.E., Zapranis, A.D. (2016) : Technical Analysis for Algorithmic Pattern Recognition. Springer.

Wan, Y., Gong, X., Si, Y.-W. (2016) : Effect of segmentation on financial time series pattern matching. Appl. Soft Comput. **38**, 346-359.

Wan, Y., Si, Y.W. (2017) : A formal approach to chart patterns classification in financial time series. Informat. Sci. **411**, 151-175.

Yin, J., Si, Y.-W., Gong, Z. (2011) : Financial time series segmentation based on turning points. In: Int. Conf. Syst. Sci. Engin., Macau.

Yosida, K. (1984) : Operational Calculus (translated from the Japanese). Springer.

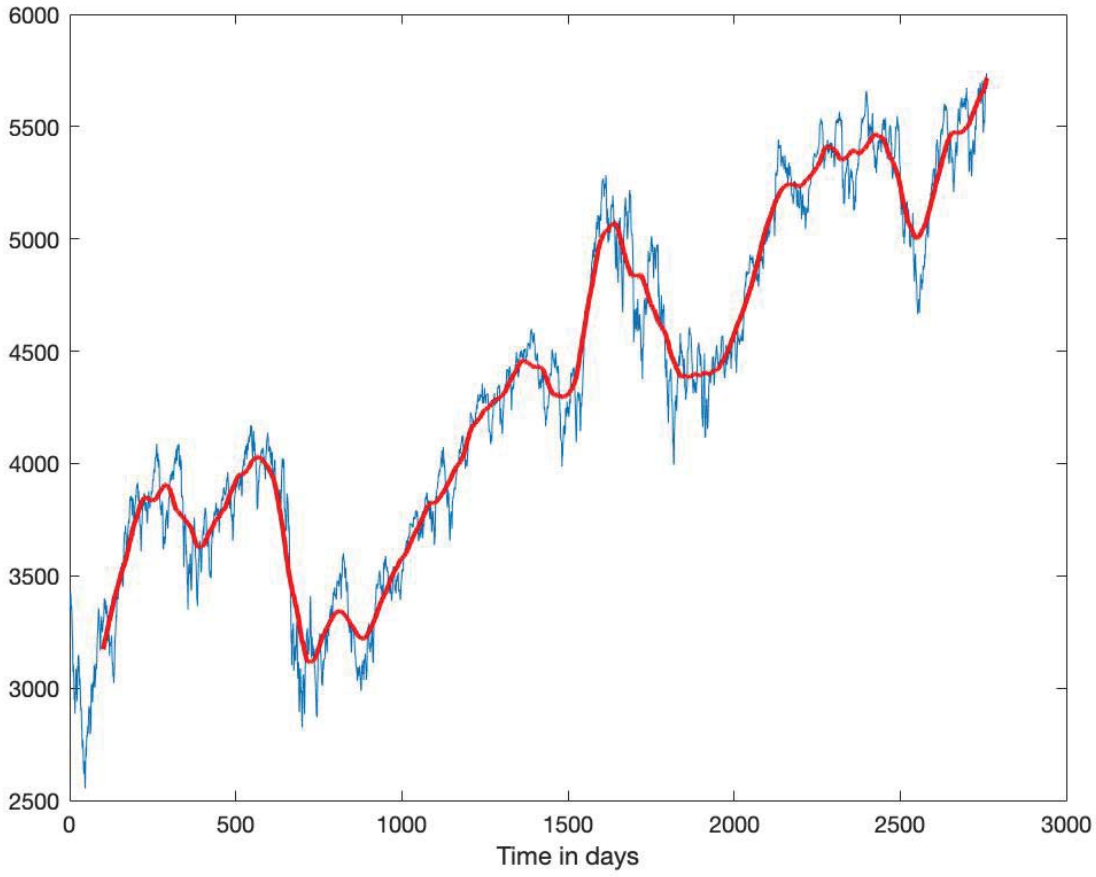
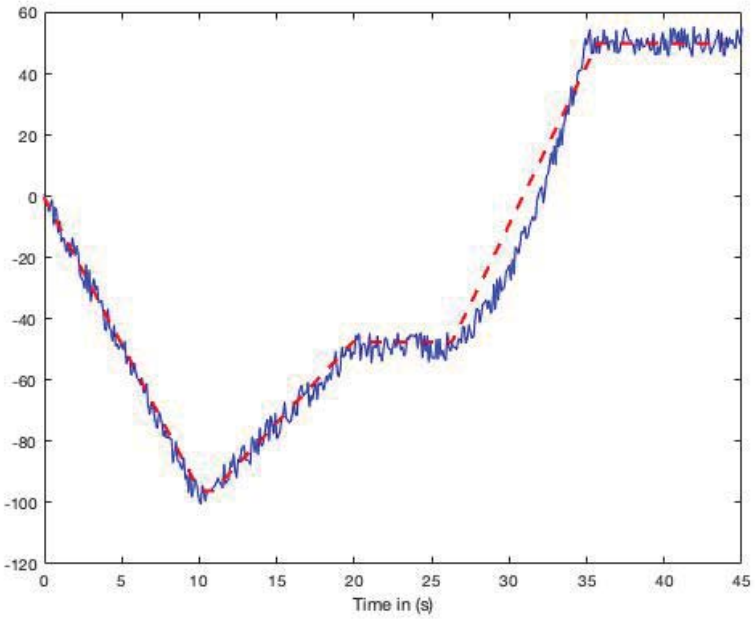
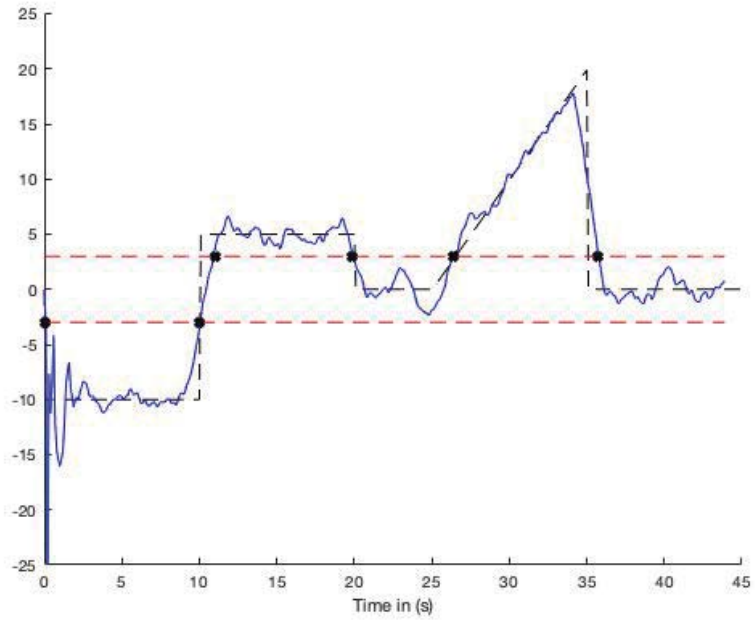


FIGURE 1 – CAC 40. En bleu : valeur quotidienne du CAC 40 du 1er janvier 2009 au 31 décembre 2019. En rouge : moyenne (glissante).

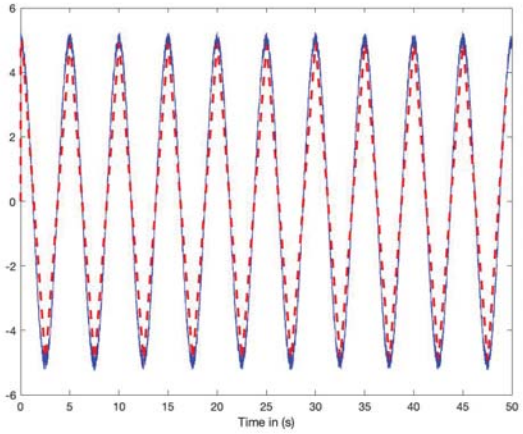


(a) En bleu : signal. En rouge : segmentation

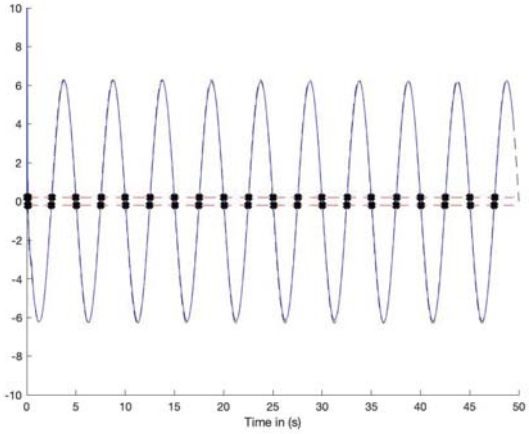


(b) Véritable dérivée (noir - -), dérivée estimée (bleu), seuils (rouge - -), passage en 0 (noir *)

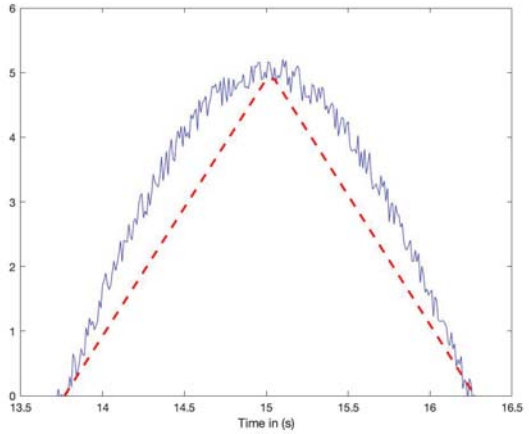
FIGURE 2 – Polynômes par morceaux



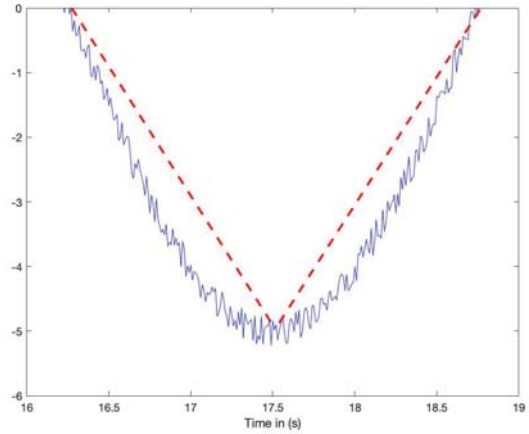
(a) En bleu : signal. En rouge : segmentation



(b) Véritable dérivée (noir - -), dérivée estimée (bleu), seuil (rouge - -), passage en 0 (noir *)

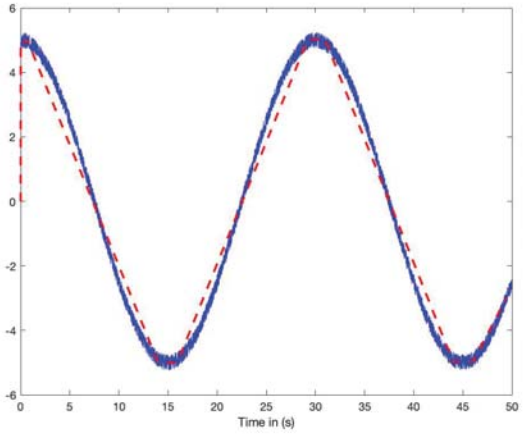


(c) Zoom de (a)

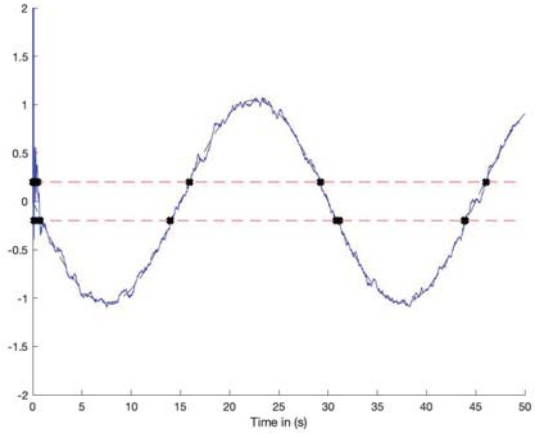


(d) Zoom de (a)

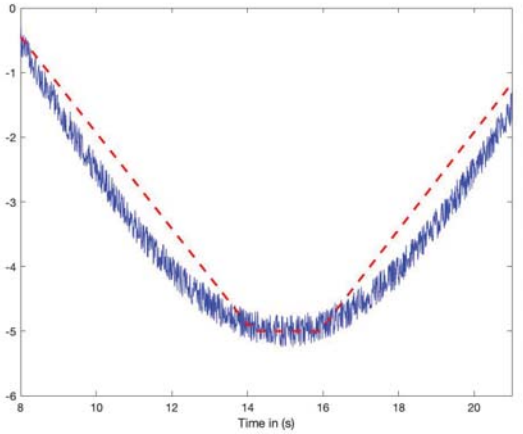
FIGURE 3 – Sinusoïde : fréquence élevée



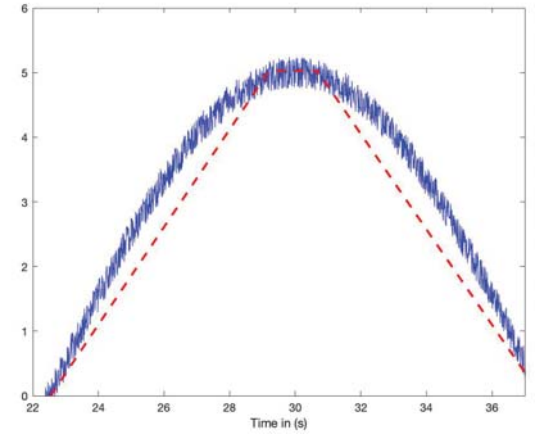
(a) En bleu : signal. En rouge : segmentation



(b) Véritable dérivée (noir - -), dérivée estimée (bleu), seuil (rouge - -), passage en 0 (noir *)

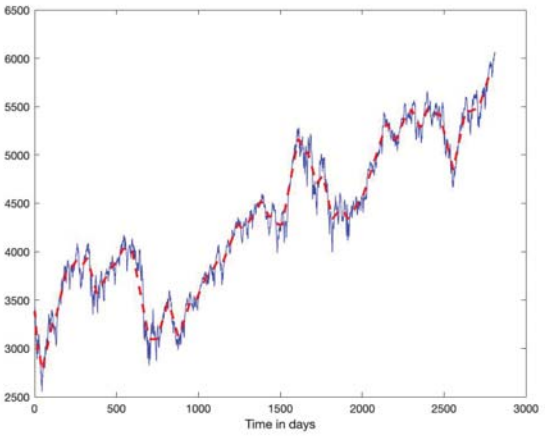


(c) Zoom de (a)

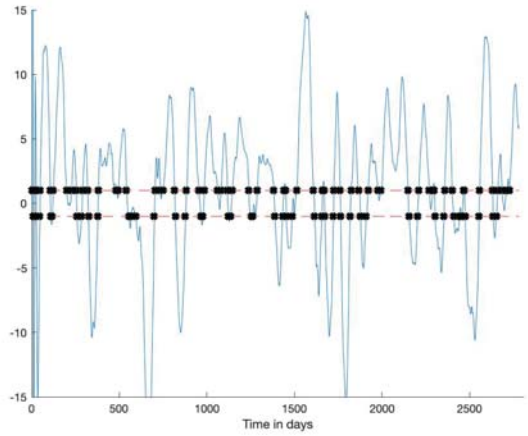


(d) Zoom de (a)

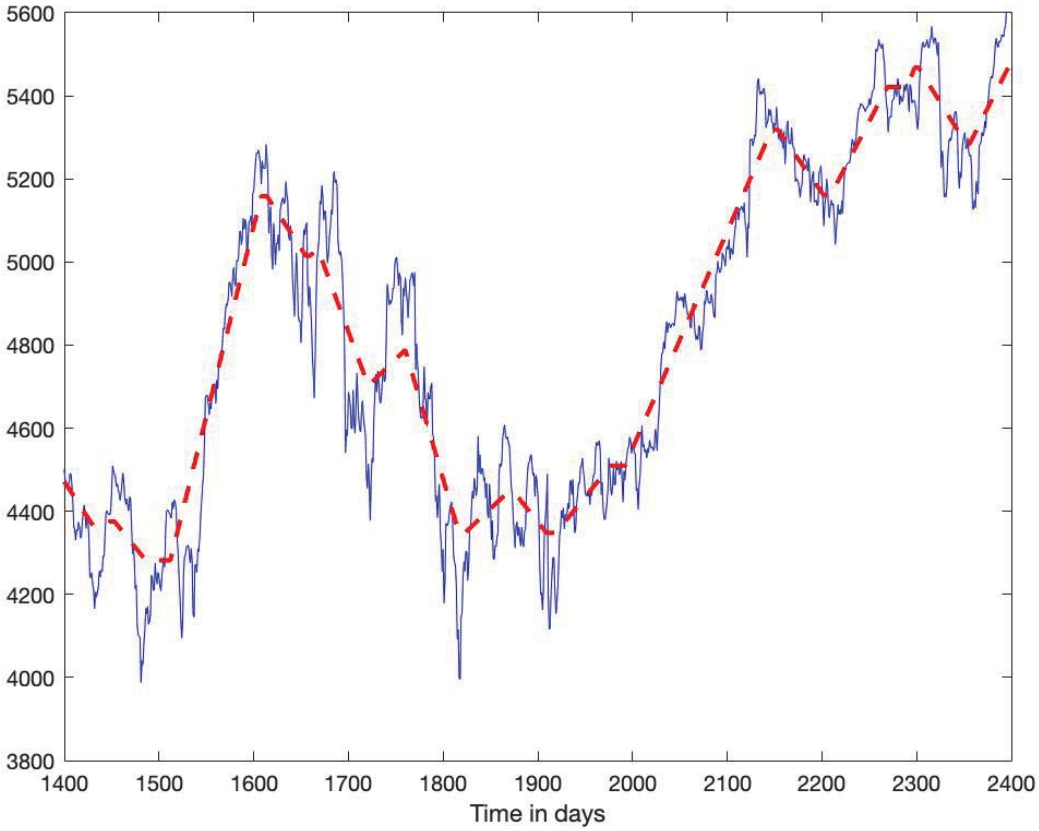
FIGURE 4 – Sinusoïde : fréquence basse



(a) En bleu : chronique. En rouge : segmentation

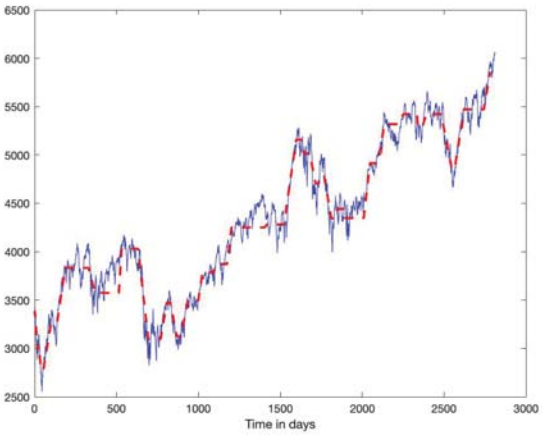


(b) Dérivée estimée (bleu), seuil (rouge - -), passage en 0 (noir *)

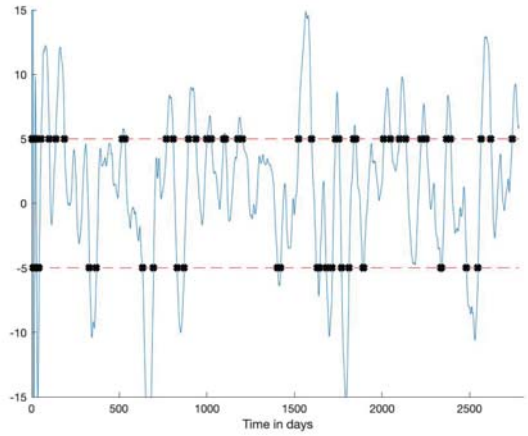


(c) Zoom de (a)

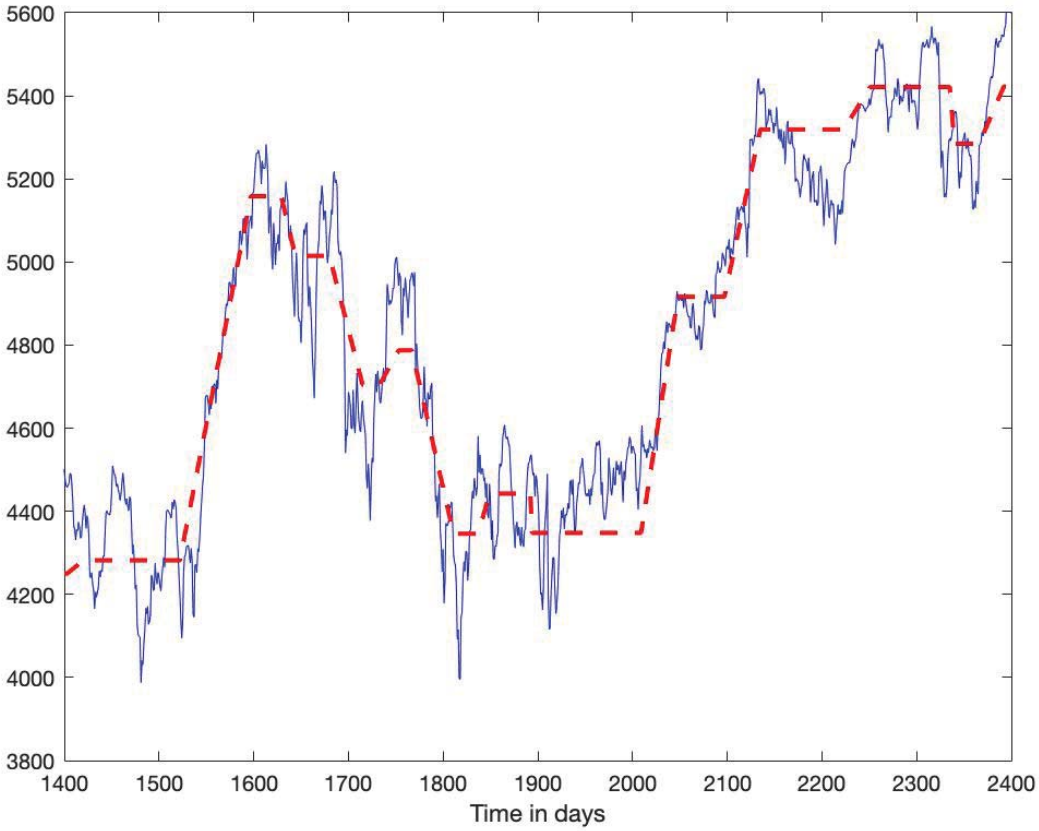
FIGURE 5 – CAC 40 : Seuil bas



(a) En bleu : chronique. En rouge : segmentation



(b) Dérivée estimée (bleu), seuil (rouge - -), passage en 0 (noir *)



(c) Zoom de (a)

FIGURE 6 – CAC 40 : Seuil haut

13^{th} *International Conference on Modeling, Optimization and Simuation* - MOSIM*'20 - November 12-14, 2020*
Agadir - Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

Big Data for Supply Chain Management in Industry 4.0 Context : A Comprehensive Survey

L. Tamym, M. D. El ouadghiri
Moulay Ismail University
IA Laboratory
Meknes, Maroc
l.tamym@edu.umi.ac.ma, dmelouad@gmail.com

L. Benyoucef
Aix-Marseille University
University of Toulon
CNRS, LIS Laboratory
Marseille, France
lyes.benyoucef@lis-lab.fr

A. Nait Sidi Moh
Picardie Jules Verne University
TI Laboratory
Saint Quentin, France
ahmed.nait@u-picardie.fr

ABSTRACT: *The world now knows a great evolution and explosion of new technologies in many domains that change our lives everyday. Obviously, This lead also to the emergence of new generation of industries commonly known as industry 4.0. Big Data is one of those great technologies, which has considered as the backbone of this type of industry. Hence, that will arise new challenges for companies, and lead them to think differently in the way they design, manage and automate their supply chains processes in order to compete better in the global market and improve their business. The competition within the market space has evolved from "firm versus firm" towards "supply chain versus supply chain". During supply chain operations a great amounts of data are generating. Consequently Big Data Analytics capabilities could be considered the main key to improve data-driven decision making. Additionally, it enable to develop innovative ways that improve business efficiency and effectiveness from this vast amounts of data. Moreover, it provide a 360-degree view of company operations. This review paper is interested in showing the importance of Big Data and Big Data Analytics in the Smart Supply Chain Management. More precisely, how they contribute in making SCM entities (Procurement, Manufacturing, Logistic/Transportation, Warehousing and Demand management) smarter to be suitable in industry 4.0 context.*

KEYWORDS: *Supply Chain Management, Big Data, Big Data Analytics, Industry 4.0, Supply Chain Analytics.*

1 Introduction

The evolution and appearance of different technologies in various domains around the world leads to the emergence of a new generation of industry or future industry. Commonly known as **Industry 4.0** and represents the fourth revolution that has occurred in the digitization of manufacturing and Supply Chain (SC). Furthermore, as Industry 4.0 unfolds, computers and machines are connected and communicate with each another to ultimately make decisions without even human involvement. A combination of cyber-physical systems, Internet of Things (IoT) and Internet of Systems (IoS) makes Industry 4.0 possible and the smart factory a reality (Marr 2018). As a result of the support of smart machines that keep getting smarter as they get access to more data, enterprises factories will become more efficient and productive and less wasteful. Thus, these enterprises if they want compete better in the global market and improve their business, they have also use and adopt all these new technologies to manage their logistics and supply chains. Indeed, they have to master their Big Data, use autonomous equipment and vehicles which provide autonomous cranes and trucks to streamline logistic operations, use also robotics which are leveraging autonomous robots that help to picking products at a warehouse and can quickly and safely support manufacturers, 3D printing which opened up a lot of possibilities for production and IoT which is a key component of industry 4.0. That is probably why some scholars argue that competition within the market space, has evolved from "firm versus firm" towards "supply chain versus supply chain". Obviously, BD has a great impact on supply chain management (SCM) of companies due to the continuous development of information technology which is growing exponentially. As well known, companies generate a great amount of data every moment which comes from different sources namely, Customers data, Suppliers data, Enterprise Resource Planing (ERP), Radio Frequency Identification (RFID), Sensors, IoT, mobile devices, online social networks, etc.

The efforts to strengthen the supply chain analytics capabilities become an important focus for all supply chains, it is a fact that big data can support the end-to-end visibility in the supply chain and create more agile and sustainable logistics/supply chain strategies (Tiwari, Wee & Daryanto 2018). Therefore

During their supply chains operations, organizations generate a great variety of data. These various data type could be collected from heterogeneous or homogeneous sources in structured, semi-structured, and unstructured formats. By adopting strategies of Big Data Analitycs (BDA) to analyze, store and manage their data, many companies have achieved sustainable competitve advantages and enhanced their productivity in the global market (Wamba, Gunasekaran, Akter, fan Ren, Dubey & Childe 2017). In this review paper we have interested in showing the importance of BD, BDA and their applications in Smart Supply Chain Management (SSCM) development of information technology which is growing exponentially, and summarizing the current trends and applications of BD in every SC function. More precisely how they contribute in making SCM functions (Procurement, Manufacturing, Logistic/Transportation, Warehousing and Demand management) smarter to be suitable in industry 4.0 context.

This review paper is structured as follows: the first section consist of an introduction. In the second section, we discussed definitions and concepts of BD and BDA levels. While in the third section we highlighted the importance of BDA in SCM, well known data sources in SCM and applications of BDA in each entity of SC, and models and techniques of BD in SCM. In the fourth section we mentioned Challenges and issues in adopting BDA for SC. Whereas in the last section we concluded our paper and mentioned some future works.

2 Big Data and Big Data Analytics

BD has the potential to revolutionize the art of management and it provides innovative tools and techniques in capturing and generating business value for enterprises and thus enhancing the Supply Chain performances.

2.1 Big Data Definitions and Concepts

The life of an enterprise architect is becoming busy and difficult. Before the era of big data, the enterprise manager only had to worry about the data and systems within their own data center. However, over the past decade there were revolutionary changes to the way information is used by businesses, and how data management platforms support the information available from modern data sources (Ema 2017). This explosion of data was leading (Fosso Wamba Samuel 2015) in their paper to ask this question, Should we develop internal data centers at the firm level or move toward a cloud-based architecture for data storage?. The increasing of data amount that an enterprises generate introduces a host of complexities, and make challenges for their managers focused on storage, security, privacy, and control. To address all these complexities which are beyond the ability of typical database software tools SGBD, many new diverse platforms have been developed to support these big data initiatives over the last decade. The most famous platforms are Hadoop, NoSQL platforms which include Cassandra and MongoDB, Enterprise Data Warehouse, Data Marts and operational support platforms such as enterprise applications like ERP and other SCM systems.

Many academics and professionals were trying to make a definition to big data. In this paper, we give some of them, and we refer the reader to (Fosso Wamba, Akter, Edwards, Chopin & Gnanzou 2015) for further definitions.
(IBM, 2017) Big data is a term applied to data sets whose size or type is beyond the ability of traditional relational databases to capture, manage and process the data with low latency. Big data has one or more of the following characteristics: high volume, high velocity or high variety. Artificial intelligence (AI), mobile, social and the Internet of Things (IoT) are driving data complexity through new forms and sources of data. For example, big data comes from sensors, devices, video/audio, networks, log files, transactional applications, web, and social media, much of it generated in real time and at a very large scale.
(Rouse, 2011) Big Data: description of the voluminous amount of unstructured and semi-structured data a company creates or data that would take too much time and cost too much money to load into a relational database for analysis.

BD has been characterized in general by 5Vs: volume, variety, velocity, veracity, and value (details and descriptions of these concepts can be found in (Benabdellah, Benghabrit, Bouhaddou & Zemmouri 2016) and (Fosso Wamba et al. 2015)): .

2.2 Big Data Analytics

In order to stay more competitive in the global market, companies have to master their BD. BDA which is an emerging technology as a holistic approach permits these companies to manage, process and analyze 5Vs data-related dimensions. Accordingly, to create relevent ideas for delivering sustained value, measure performance and establish competitive advantages (Wamba et al. 2017). In addition, improve data-driven decision making and develop innovative ways that enable improving business efficiency and effectiveness from those vast amounts of data. Researchers and professionals consider BDA as a "fourth paradigm of science", a "new paradigm of knowledge assets" or "the next frontier for innovation, competition, and productivity" (Manyika, Chui, Brown & Bughin 2011). The interest of BDA is to shake up

classical analysis by providing agility in the way of apprehending and solving problems. Indeed, by processing heterogeneous data simultaneously and real-time processing, and anlytics. That can be done for example using machine learning and deep learning technologies. In one hand it is worth noting that it is possible to apply Business Intelligence (BI) methods, including data visualization, and advanced analytical methods such as data mining. In the other hand there is a set of methods and techniques specific to Big Data, if only because, BI and data mining tools cannot handle unstructured data.

Depending on the depth of analysis and data types, data analytics techniques are classified into three levels: **Descriptive analytics** provides information about what has been achieved and therefore helps to understand what has happened. **Predictive analytics** provides models to predict what might will happen. It mustily relies on Data Mining, machine learning and deep learning techniques which provides statistical models. A common technique is regression analysis, which predicts the values of several related variables. **Prescriptive analytics** helps to choose the best solution among several possibl solutions to guide what is going to happen in the future.

3 Big Data Analytics in Supply Chain Management

In this section, we will try to answer three main questions about the use of BD in SCM. These questions are: (i) In what areas of SC, BD is being generated? (ii) In what areas of SC, BDA is being applied? (iii) and what models and techniques of BDA are applying in SCM? Supply Chain or Extended entreprises can be defined as a combination of different and independent services such as Marketing, Procurement, Warehouse Management and Transportation. All these services are interlinked and connected to each others, directly or indirectly, by sharing information, material, financial flow (Nguyen, Zhou, Spiegler, Ieromonachou & Lin 2018). SCM information systems is responsible for creating and maintaining the link of these organizations. More precisely between producers and suppliers as well as between their partners, in order to improve their businesses, from procurement of raw materials to ultimate end user delivery of the final product. Within the era of Industry 4.0, the entreprises have got access to a huge variety of advanced technologies such as sensors, IoT, mobile devices, online social networks, etc. In addition they adopt a variety of Information and Communication Technologies for Supply Chain Management (e.g. RFID, Enterprise Resource Planning (ERP), IoT, etc) to collect, manage and store their data. thus, the Supply Chains become more and more complex. This Complexity is associated with the heterogeneous material and information flows between supply chain partners. Traditionally, these flows are organized sequentially from supplier to customer. Today, information flows do not follow this linear trajectory. Information flows rather now look like a simultaneous and real-time exchange or even shared, especially through electronic exchanges between all supply chain partners ((Benabdellah et al. 2016)), or through collaborative platforms (Gnimpieba, Nait-Sidi-Moh, Durand & Fortin 2015). Some key characteristics of this complexity are: Number of components, Diversity, Interdependency, Dynamicity, Uncertainty (Benabdellah et al. 2016).

3.1 Big Data Sources in SCM

With the adoption of advanced technologies in SC, the velocity of generating a great variety of data become critical (Li & Liu 2019). The BD could come from different SCM systems, such as:

Social Media the embedding of social media in the SC processes can help to gather information from a broad base of different sources. In this case BDA tools can be used to discover new trends or for better-informed decision-making, in order to enhance communication with customers, generate demand, reduce operating costs, mitigate risk, increase productivity, and enhance marketplace intelligence. For instance (Chae & Bongsug 2015) in their study, they developed an analytical framework (Twitter Analytics) for analyzing supply chain tweets, highlighting the current use of Twitter in SC contexts, and further developing insights into the potential role of Twitter for SC practice and research. The main role of their proposed framework is extracting intelligence from 22,399 SC tweets. They found that some SC tweets can be used by different groups of SC professionals and organizations (e.g., news services, IT companies, logistic providers, manufacturers) for information sharing, hiring professionals, and communicating with stakeholders etc. Some others carry strong sentiments about companies' delivery services, sales performance, and environmental standards, and risk and disruption in SCs.

Radio Frequency Identification (RFID) which is a form of extremely low-power data communication between a scanner and tags (David & Chadwick 2015). When an item goes through the RFID scanners, information is read from the tag, which could include any amount of information, such as Order ID number, Product bin location, Order status, Serial numbers for individual product components, Location logs. Also, it could updates and transfers information through any RFID receiver, when in range it can be joined with other software to update databases, send information online, or served for data processing (David &

Chadwick 2015). Hence RFID technology can lead to completely autonomous warehouses and distribution centers. In addition in cloud manufacturing systems, this technology is deployed to create an intelligent production environment, where enormous manufacturing data are captured and collected instantly (Zhong, Newman, Huang & Lan 2016). Deployment of RFID tags and readers on logistic objects can convert them from 'passive smart logistics object' to 'active smart logistics object' (Zhong et al. 2016). When these physical objects start communicating via wireless communication, an enormous volume of data are generated in real-time making it difficult to be handled (Arunachalam, Kumar & Kawalek 2018).

Electronic Data Interchange (EDI) has improved communictation, coordination and collaboration across supply chain processes. Nevertheless, EDI generate a volume of data through data exchange from the involved actors in the supply chain network (Arunachalam et al. 2018), for example, purchase orders, shipment authorizations, shipment acknowledgements, advanced shipment notices, or invoices, etc. SCM EDI transactions must adhere to standardized document formats that are outlined in international standards. The decision about which standard to adopt is determined by factors of global business, industry, or by mutual agreement with a trading partner. There are four main technical standards : UN/EDIFACT, ANSI X12, TRADACOMS, ODETTE.

Enterprises Resource Planing (ERP) Is the popular Information Technology (IT), which often serves as a centralized data repository or data IT infrastructure. ERP enable to manage all company's operational processes by integrating several management functions: order management solution, inventory management solution, payroll and accounting management solution, e-commerce management solution, BtoB or BtoC business management solution, in one system. In other words, the ERP represents the "backbone" of a company. Among many benefits, ERP has become a key enabler of data management for supply chain through enterprise-level data acquisition and data access by decision makers (Chae & Olson 2013). Famous known ERP are SAP (mondial leader), Oracle/Peoplesoft, Microsoft, etc).

Customer Relationship Management (CRM) refers to information technology or software that manages relationship between business and customers. CRM enables analyzing customer information based on customer data collected (preferences, buying patterns, requested products, etc). It is also applied to the process of managing suppliers, vendors, and other stakeholders, through a buying lifecycle (Özlen & Hadžiahmetović 2013).

Warehouse management (WMS)(see warehouse management part in section 3.2 for more details).

Cyber Physical System (CPS) are systems of collaborating computational entities that are in intensive connection with the surrounding physical world and its on-going processes. CPS provide and use, at the same time, data-accessing and data-processing services available on the internet. However advanced concept of CPS today can be considered as the main factor contributing to the development of Industry 4.0. In addition advanced manufacturing concept is investigating from CPS for developing new business models. Thus, By integrating Industry 4.0 and CPS smart devices are able to access and analyse abundant data of themselves as well as other items and thereby automatically react to current health condition. CPS could also be implemented in supply chain management to utilize more efficacy vehicles called shared autonomous vehicles. Furthermore CPS process is called Robotic Process Automation, which could reduce manual work and provide more efficient resource utilization in various areas (Gruzauskas & Navickas 2018). CPS also, enable full transparency of SC's material flows, by collecting and using of large amounts of data trough SC process, and by analyzing and interpreting these data. For example CPS technologies allow tracking products, ensuring security for all chain's elements, accessing to data communication common platform, facilitating the knowledge about demand, stock and sales, sensorial tools for the prediction of eventual anomalies during production, among other factors (Frazzon, Silva & Hurtado 2015).

These complex systems are the primary data sources for the occurrence of data deluge in supply chains. The supply chain data generation was further revolutionised with the advent of IoT technology facilitating real-time sensing and transfer of events data (Arunachalam et al. 2018). In order to use these generated data and preparing them for further processing, by structuring them in a standard formats to obtain integrated data. Online Analytical Processing (OLAP), data warehouses and cloud computing, are examples of IT resources for transforming data to analytical data. Thus, improve supply chain planning and performance management and give decision makers effective operational reporting and dashboards. The process of integrating data often reveals various data quality issues such as inaccuracy and redundancy.

3.2 Big Data Analytics Levels in SCM

BDA is considered the main key that enable companies as well as SCs to be adapted in the current fast-paced and ever-changing market environment. Many

researchers reported that BDA in SCM has multiple advantages such as reduced operational costs, improved SC agility, and increased customer satisfaction, etc (Nguyen et al. 2018). In addition, BDA will arise many challenges for data scientists and companies. (Nguyen et al. 2018) in their review paper have designed a global graphical classification framework that englobe SCM functions with the BDA levels and models (Fig. 1). The first layer of this figure shows the main SCM functions namely, Procurement, Manufacturing, Logistic/Transportation, Warehousing and Demand management. The second layer illustrates BDA levels and the last layer mentions some BDA models well-known in the literature.

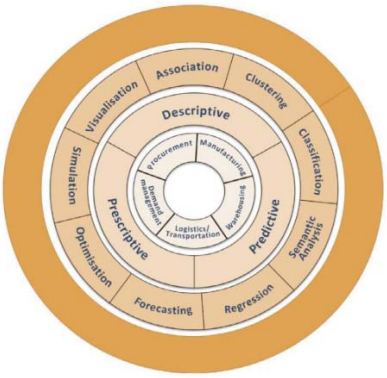


Figure 1 – Classification Framework (Nguyen et al. 2018)

Procurement involves the longer term planning of how a firm sets up their purchasing function (Alliance 2009). BDA dedicated in this area, to adress three major issues, which are Supplier Selection, Sourcing Cost Improvement and Sourcing Risk Analysis (Nguyen et al. 2018). To handle Supply Chain Coordination (SCC) especially production procurement coordination, supply chain stakeholders have collectively posed a number of tactical and strategic decisions to achieve mutually defined and shared goals. One of these decisions is Supplier Selection Problem which is considered as one of the main SCC problems by professionals (Igoulalene, Benyoucef & Tiwari 2015). (Shanin 2018) argued that predictive analytics level more specifically, machine learning with intelligent algorithms will challenge supplier relationship management strategies. Furthermore, he also argued that the application of BD models on this issue still in its early stage. However, to enhance their businesses companies in procurement area have to master, accurate and manage suppliers data, and compile the actions and information over a long period of time for present and future use. Procurement professionals have to be in a position of carrying out intelligent and predictive supplier selection, by improving transparency in procurement activities and create more opportunities for relationships in a long-term and find out which suppliers matches their needs and demands. The same case for sourcing cost improvement and sourcing risk analysis, where companies use predictive anlytics to reduce sourcing cost and make sourcing process intelligent. For example relying on large sets of historical purchase orders and supplier delivery data, can reveal hidden facts and potential problems with internal sourcing processes and supplier delivery performance (Chae & Olson 2013). Within the increasing of uncertainty in economic, organizations are aware to monitor and manage markets conditions including budgets, profit objectives, market pricing, technology insights and frauds, etc. Thus, companies have to improve their supply chain strategies, by creating what we call supply market intelligence (SMI) (Handfield 2010).

Logistic/transportation: in this area BDA aims to develop intelligent transportation systems (ITS) by relying on four fundamental applications among SC: routing optimization, real-time traffic operation monitoring, proactive safety management, logistic planning (Nguyen et al. 2018). (Talari 2018) reveiled that BD application will change the world of logistic and transportation due to managment of massive flow of goods, and real-time traffic flow information, that create at the same time vast data sets (ex. millions of shipments every day, origin and destination, size, weight, content, and location using GPS or OpenStreetMap data) are all tracked across global delivery networks. Hence delivery processes in logistics have become complex due to travel conditions or traffic information, such as increasing fuel prices, driver shortages, weather conditions, and government regulations and laws. Furthemore, the use of BDA can help to enhance the hole transportation processes involved among SC operations. For example with the help of Big Data technologies, the entire transportation process could be real-time end-to-end tracked (Joshi 2019). (Borgi, Zoghlami, Abed & Naceur 2017) in their review article "Big Data for Operational Efficiency of Transport and Logistics", argued that taking advantages of capabilities of big data technologies to optimize the utilization of resources and reduce operational costs, can be an important advantage for any logistic providers. In this work, five major issues in logistic and trnasportation that BDA could adress, were mentioned : Last-mile Delivery, Route Optimisation, Crowdsourcing and Social Transportation, Smart Logistics, and Anticipatory Logistics. For last-mile delivery which is known to be the most complicated and the most expensive part of the delivery process, BDA tools can optimise the matching between demand and available resources, transform the delivery network into a sef-organizing infrastructure and help tracking and monitoring automatically freight vehicles and chipment items in real-time. Yamato is one of last-mile delivery company, and is considered

as the largest Japanese door-to-door delivery service (Steger 2017). Whereas in route optimization field, BD descriptive and predictive capabilities and metaheuristic methods like genetic algorithms help companies to perform optimization tasks. Among these tasks, there are resources planning, optimal path by relying on traffic data or traffic flow, predict and detect traffic congestion on roads and improve punctuality, etc. Crowdsourcing approaches use BD and social transportation to design efficient transportation systems based on the real-time data collection and data updated such as GPS, smart devices, social medias, social behavior, travel behavior, chosen trajectories, cultures and organizations data. Analyzing and managing all these data provide a live description of the traffic situation, and help to build a world of connected people, vehicles, infrastructures and services and produce ITSs (Borgi et al. 2017). The combination of Big Data capabilities and IoT technologies lead to implementing of fully autonomous decision process or self-driving and intelligent vehicles in the transport and logistic field. All these innovative technologies also lead to Smart Logistic. For example, based on sales big data, it is possible to determine which goods and with which quantities are kept in stock in warehouse centers. In the same way Amazon company applied what is called "Antizipatory Shipping" aiming to optimize the delivery time by relying on various sources such as the purchase and search history, notepads or wish lists and the time the mouse pointer stays on certain offers. consequently therefore, that help Amazon company to deliver goods to a delivery warehouse that customers in this region have not yet ordered (Berthold 2019).

Marketing Intelligence and E-commerce is generally a subset of economic intelligence that allows companies to develop decision support systems based on big data collected from various systems as discussed above . Analyze these data will help them to master information and derive insights about their customers and markets to better adapt to the environment in which they are located. This allow also to quickly anticipate, adapt, and react to changing business conditions. In this part of SCM, companies are looking to enhance their businesses using predictive analytics. However, that will improve their demand management in terms of shaping demand to be aligned with production and logistics capacity, capturing demand changes in real-time, and sensing demand behaviors to increase the agility and accuracy of demand forecasting (Nguyen et al. 2018). Demand forecasting is one of the critical aspect of SCM, for this reason to address this challenge, companies use predictive analytics or real-time analytics capabilities on customers data (i.e. social media ,sales , customer reviews, behavioral data, etc) in order to improve customer satisfaction, develop innovative products. Thus, BDA models can help e-commerce supply chain to identify, predict and manage demand chain (Arunachalam et al. 2018). Analytics capabilities especially perspective and predictive analytics can help to enhance demand planning which is a critical function area by gathering customer requirements, collecting information on available resources, and balancing requirement and resources to predict market trends of products and services. More precisely developing supply plans to match market demands (Chae & Olson 2013). Furthermore, growth of e-commerce has brought a lot of new opportunities and challenges to the traditional business models by enabling buyers and sellers to be much closer and connected together on dedicated market platforms (i.e. Amazon, eBay, etc). Indeed organizations today have started working via websites and they are selling or buying via the internet. Thus, e-commerce business is completely impacts SCM, because the development of new e-commerce sites and platforms increases rapidly, but customers prefer that have proper SCM to deliver the products on time and for cheap prices.

Smart Manufacturing has always been a backbone of the global economy (Touzout & Benyoucef 2019). Within the evolution of technologies world become more and more digitalised. So to aligned with this great evolution, serveral companies have transfomed their manufacturing systems. To do so they should integrate major management disciplines such as risk management, change management, knowledge management, and project and programme management within their production processes (Kumar, Graham, Hennelly & Srai 2016). In this work the authors proposed an integrated framework, which summarizes the key aspects that help to enhance links between smart city endowed with new manufacturing technologies and logistics with supply chain network design. In addition, it is agreed that in order to seize the smart cities opportunities, firmes should explore their synergies with IoT and Big Data capabilities. In fact, the new manufacturing concepts (3D printer, Automation, etc) show us how a smart city production system can change future supply chain design. BDA capabilities in this field of SCM can improve visibility, responsiveness, and performance of material management, and provide a 360-degree view of manufacturing operations (Arunachalam et al. 2018). In addition, all efficient and innovative technlogies such as cloud computing, cloud storage, and IoT are creating golden oppotunities for manufacturers who can now use massive data volumes in unexpected new ways and turn it into actionable analytics. This enables to improve business, reassure product quality, increase productivity, and detect anomalies, etc. More precisely, using predictive anlytics enables to monitor manufacturing operations and to predict when a machine or

tool will breakdown, before it starts making up defective products. As well as, using prescriptive analytics to make machines under a total control (White 2015). Furthermore cloud manufacturing is a new paradigm that transform traditional manufacturing resources into smart manufacturing objects (SMOs). These objects can sense, connect, react, interact, and cooperate automatically in order to be able to provide safe and reliable, high quality, sustainable, and on-demand services for the entire manufacturing lifecycle. To do so a large number of sensors are deployed to create an intelligent production environment, where enormous manufacturing data are captured and collected instantly, such as RFID, barcode, QR code, and wireless manufacturing devices, etc (Zhong, Lan, Xu, Dai & Huang 2015).

Warehousing Management (WM) is a key part of the supply chain management, that aims to control the movement and storage of material flows within a warehouse. WM treats many transactions associated to these flows including shipping, receiving, putaway and picking, and mainlly monitors the progress of products through the warehouse by involving physical warehouse infrastructure, tracking systems, and communication between product stations. BDA in WM focuses on three main operations namely storage assignment, inventory control and order-picking problems (Nguyen et al. 2018). For instance "Wal-Mart store" relies up on modern data management to gain competitive advantage in supply chain and inventory management, making it one of the most profitable business organizations in the 20th Century. It has invested in one of the largest private data management system in the world (Chae & Olson 2013). In addition as we have already discussed about how logistics plays a key role in the supply chain, in this part we are interesting in how it helps enterprises to manage, maintain and optimize their inventory. Thus Warehouse Management System (WMS) is one of the IT logistics systems that help enterprises to store, manage and analyse their data within a warehouse efficiently (i.e. Master data : supplier, items and customer data; Transaction data : receiving, chipping, inventory tracking, cycle counts, inventory adjustments, and value added services data; Business data : customer requirements, consumer behavior, etc). WMS provides the logistics channel visibility acros all parties involved in the SCM operations. Accordingly data analytics including predictive analytics, offer a new way to look at all that data for more visibility results in the right actions, at the right time, and efficient business forecasting (Andiyappillai 2019).

The figure 2 below illustrates the main steps to go through, from generating various data amount in every function of SC, and analyzing these data by using BDA levels in order to get insights from them. Those insights will help companies to better governance of their business and make better decisions.

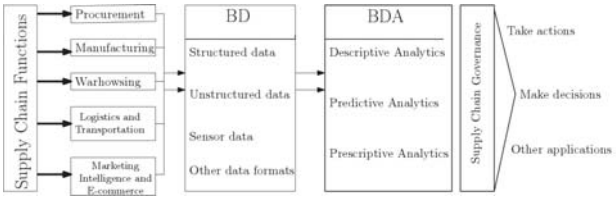


Figure 2 – General Framework of BD and BDA in SCM

3.3 SC Analytics and BDA Models and Techniques

Based on literature review we have summarized some BDA applications in CSM by mentioning the most used models and techniques in this field (table 1).

4 Challenges and issues in Adopting Big Data Analytics for Supply Chain

With the evolution and changes of BD techs and models and its increasing adoption in SCM field, in order to enhance SCM performances. Companies faces many challenges and issues which can be categorize into two categories such as Organizational and Technical Challenges in each above SC entity :

BD complexity : Among SC, complex cross-functional data for interlinked entities being generated, collected and stored should be streamlined. On one hand that will rise difficulties related to access to real time data due to lack of necessary infrastructures to do this operation, because of the incompleteness, the inconsistency and the heterogeneity of these BD. On other hand will also rise another issue related to time-consuming in making the analytics process due to the huge volume of BD generated. When it comes to regional or global Supply Chain Networks, companies might face difficulties in sharing data across its different sources due to various Privacy and Security laws, because lack of shared data in such cases can affect the accuracy of the insights that BDA might generate.

Lack of skills: The complexity of Big Data generated from SC operations requires a combination of good domain knowledge analytics skills and the ability to interpret the usability of data which are difficult to find.

maturity of models : Organisations in BD models conceptualisations have not yet reach the signicant maturity. There are organisations that still in initiation stages. They are aware of BDA and considering it for leveraging, but have not implemented it, are presumably Data Poor and Information Poor, in this case the level of BDA capabilities

Table 1 – SC analytics and BDA models and techniques

SC entities	Analytic categories in SCM	**Models and Techniques**	**SCM performance**
Procurement	-Enabling more supplier networks by focusing on knowledge collaboration and supplier selection -E-procurement -Sourcing cost and sourcing risk management -Capture performance requirements for procurement contracts	-Data mining and Machine learning: time series analysis, association rule mining, classification, clustering and Regression and deep learning, etc. -In-memory analytics: in-memory OLAP, in-memory ROLAP, in-memory spreadsheet, etc.	-Sustainability. -Agility. -Collaborative. -data-driven decision making. -Efficient linkage. -Visibility. -Automation and digitization.
Manufacturing and Planification	-Risk evaluation and resilience planning. -Monitoring the performance and improving planning and management functions. -Quality management -Maintenance and diagnosis -Minimizing bottlenecks by developing forecasting techniques	-Real-time analytics: Kafka, Apache, KSQL, SAP HANA, etc. -Natural language processing: Web mining, text mining, sentiment analysis and feature selection. -Spatial regression modeling -Business Intelligence. -Cloud computing. -Crowdsourcing. -Crowdcomputing.	- Responsiveness. - Flexibility and adaptability. - Serviceability. - Collaboration and Coordination among the partners. - Transparency in supply chain operations. Connectivity. -Availability of timely, accurate, precise and relevant information.
Warehousing	-Managing and optimizing inventories based on user demographics -Storage assignment and order picking -Inventory control		
Logistics/ Transportation	-Routing optimization -Real-time traffic operation monitoring -Proactive safety management -Intelligent transportation system -Logistics planning and in-transit inventory management	-Exact and meta-heuristic optimization methods : Mathematical and dynamic programming. -Visualisation : OLAP, Dashboards, Real-time information monitoring, t-SNE, reporting	- Predictability
Marketing intelligence	-Demand forecasting, sensing and shaping -E-business	-Simulation: FlexSim, ARENA, Witness, ARIS, etc.	

will be low. Whereas organisations in adoption stage are aware of BDA technology, and possess a high level of Data Generation and Data Integration and Management Capabilities but not Advanced Analytics capabilities as Data Rich and Information Poor. Besides, only few organisations that possess a high level of all key BDA capabilities and fully integrate their business processes at the stage of routinisation. These organisations will be the leaders in BDA practice and are certainly Data Rich and Information Rich (Arunachalam et al. 2018). As (Vieira, Dias, Santos, Pereira & Oliveira 2020) argued that no study has used Big Data concepts and technologies to store, integrate and provide real data to SC simulation models in the BD context, despite the benefits that such solutions are expected to bring to SCM. Furthermore the scope of most studies upon the applying of BDA models in SCM is reduced to a specific process, while do not consider all activities occurring in a SC.

Conclusions and Future Work

In this paper we provide an overview about the interest of Big Data and Big Data Analytics capabilities in Supply Chain Management. While relying on this literature review, we aim to answer these three main questions: in what areas of SCM these amount of data are being generated?, in what parts of SCM, BDA is being applied?, and what kind of BDA models and techniques are applied in each part?. We also discussed the industry 4.0 and the role that BDA plays for its implementation. Hence with the growing and explosion of BD and its combination with another technologies such as IoT, smart systems, and artificial intelligence algorithms companies have to think differently in how they design and manage their SCs operations to compete better in the global market. In addition, several companies adopt a variety of Information and Communication Technologies for SCM (e.g. RFID, Enterprise Resource Planning (ERP), IoT, etc) to collect, manage and store their data. BDA capabilities are an efficient tools that enable companies to derive valuable insights from these data among SCM, by using three levels of analytics : descriptive, predictive, and prescriptive anlytics. Their objective is to improve data-driven decision making and develop innovative ways that enable improving business efficiency and effectiveness. To do so there are several concerns concerning BD that we have take into account, such as, insufficient resources, privacy and security, lack of skills, etc. For further research in the future, we will address the challenges of BDA capabilities by proposing a full big data architecture for SCM that take into consideration all SC functions and BDA levels to help companies to have an overview of all their SC operations. As we have discussed in BD challenges and issues in SCM that the proposed BDA models in SCM is reduced to a specific process, while do not consider all the activities occurring in a SC, may we will handle this issue in the future.

References

Alliance, G. I. (2009). Market intelligence for supply chain management.
URL: *https://www.m-brain.com/wp-content/uploads/2015/04/10871.pdf*

Andiyappillai, N. (2019). Data analytics in warehouse management systems (wms) implementations, *International Journal of Computer Applications* **181**: 14–17.

Arunachalam, D., Kumar, N. & Kawalek, J. P. (2018). Understanding big data analytics capabilities in supply chain management: Unravelling the issues, challenges and implications for practice, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **114**(C): 416–436.

Benabdellah, A., Benghabrit, A., Bouhaddou, I. & Zemmouri, E. M. (2016). Big data for supply chain management: Opportunities and challenges, *2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA)* pp. 1–6.

Berthold, G. (2019). Anticipatory logistics: Why delivery will take place before the order in the future.
URL: *https://www.lead-innovation.com/english-blog/anticipatory-logistics*

Borgi, T., Zoghlami, N., Abed, M. & Naceur, M. S. (2017). Big data for operational efficiency of transport and logistics: A review, *ICALT International Conference on Advanced Logistics and Transport* pp. 113–120.

Chae, B. K. & Olson, D. L. (2013). Business analytics for supply chain: A dynamic-capabilities framework, **12**(01): 9–26.
URL: *https://EconPapers.repec.org/RePEc:wsi:ijitdm:v:12:y:2013:i 01:n:s0219622013500016*

Chae & Bongsug (2015). Insights from hashtag supplychain and twitter analytics: Considering twitter and twitter data for supply chain practice and research, *International Journal of Production Economics* **165**: 247–259.

David & Chadwick (2015). Rfid and its effect on supply chain management.
URL: *https://www.fronetics.com/rfid-and-its-effect-on- supply-chain-management/*

Ema (2017). Making Sense of Big Data A Day in the Life of an Enterprise Architect.
URL: *https://www.ibm.com/downloads/cas/KJLWJG2L*

Fosso Wamba, S., Akter, S., Edwards, A., Chopin, G. & Gnanzou, D. (2015). How 'big data' can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study, *International Journal of Production Economics* **165**: 234–246.

Fosso Wamba Samuel, Akter Shahriar, B. J. P. R. B. E. (2015). Big data analytics for supply chain management: A literature review and research agenda, *Springer International Publishing* pp. 61–72.

Frazzon, E. M., Silva, L. S. & Hurtado, P. A. (2015). Synchronizing and improving supply chains through the application of cyber- physical systems, *IFAC-PapersOnLine* **48**(3): 2059 – 2064. 15th IFAC Symposium onInformation

Control Problems inManufacturing.
URL: *http://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/S240589631500631X*

Gnimpieba, Z., Nait-Sidi-Moh, A., Durand, D. & Fortin, J. (2015). Using internet of things technologies for a collaborative supply chain: Application to tracking of pallets and containers, *Procedia Computer Science* **56**: 550–557.

Gruzauskas, V. & Navickas, V. (2018). Cyber-physical systems expression in industry 4.0 context, *Financial and credit activity: problems of theory and practice* **2**.

Handfield, R. (2010). Supply market intelligence: Think differently, gain an edge.
URL: *https://www.scmr.com/article/ $supply_m arketintelligence_t hink_d if ferently_g ain_a n_e dge$*

Igoulalene, I., Benyoucef, L. & Tiwari, M. (2015). Novel fuzzy hybrid multi-criteria group decision making approaches for the strategic supplier selection problem, *Expert Systems with Applications* **42**: 3342 – 3356.

Joshi, N. (2019). 5 use cases of big data in logistics.
URL: *https://www.allerin.com/blog/5-use-cases-of-big-data-in-logistics*

Kumar, M., Graham, G., Hennelly, P. & Srai, J. (2016). How will smart city production systems transform supply chain design: a product-level investigation, *International Journal of Production Research* pp. 1–12.

Li, Q. & Liu, A. (2019). Big data driven supply chain management, *Procedia CIRP* **81**: 1089 – 1094. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019.

Manyika, J., Chui, M., Brown, B. & Bughin, J. (2011).
URL: *https://bigdatawg.nist.gov/pdf $/MGI_b ig_d ata_f ull_r eport.pdf$*

Marr, B. (2018). What is industry 4.0? here's a super easy explanation for anyone.
URL: *https://www.forbes.com/sites/bernardmarr /2018/09/02/what- is-industry-4-0-heres-a-super-easy-explanation-for-anyone*

Nguyen, T., Zhou, L., Spiegler, V., Ieromonachou, P. & Lin, Y. (2018). Big data analytics in supply chain management: A state-of-the-art literature review, *Computers & Operations Research* **98**: 254–264.

Shanin, S. (2018). How big data and machine learning are transforming supply chain management.
URL: *fhttps://www.eteam.io/blog/transforming-supply-chain*

Steger, I. (2017). How a 100-year-old delivery firm is emblematic of all of japan's demographic and labor woes.
URL: *https://qz.com/1054861/ yamato-9064jp-japans-largest-delivery-company*

Talari, S. (2018). Transforming logistics using big data.
URL: *https://tdan.com/transforming-logistics-using-big-data/22808*

Tiwari, S., Wee, H. & Daryanto, Y. (2018). Big data analytics in supply chain management between 2010 and 2016: Insights to industries, *Computers Industrial Engineering* **115**: 319 – 330.

Touzout, F. & Benyoucef, L. (2019). Multi-objective multi-unit process plan generation in a reconfigurable manufacturing environment: a comparative study of three hybrid metaheuristics, *International Journal of Production Research* **57**: 7520–7535.

Vieira, A. A., Dias, L. M., Santos, M. Y., Pereira, G. A. & Oliveira, J. A. (2020). On the use of simulation as a big data semantic validator for supply chain management, *Simulation Modelling Practice and Theory* **98**: 101985.

Wamba, S. F., Gunasekaran, A., Akter, S., fan Ren, S. J., Dubey, R. & Childe, S. J. (2017). Big data analytics and firm performance: Effects of dynamic capabilities, *Journal of Business Research* **70**: 356–365.

White, G. (2015). 3 ways big data is changing the future of manufacturing.
URL: *https://www.manufacturingglobal.com/ technology/3-ways-big-data-changing-future-manufacturing*

Zhong, R., Lan, S., Xu, C., Dai, Q. & Huang, G. (2015). Visualization of rfid-enabled shopfloor logistics big data in cloud manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **84**.

Zhong, R., Newman, S., Huang, G. & Lan, S. (2016). Big data for supply chain management in the service and manufacturing sectors: Challenges, opportunities, and future perspectives, *Computers and Industrial Engineering* **101**: 572–591.

Özlen, M. & Hadžiahmetović, N. (2013). Customer relationship management and supply chain management, *World Applied Programming* **3**: 126–132.

13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation - MOSIM'20 - 12 au 14 novembre 2020
Agadir - Maroc "Nouvelles avancées et défis pour des industries durables et avisées"

MODÉLISATION ET OPTIMISATION DU PROBLÈME DE PLANIFICATION DE TYPE RMRP

Ilhem SLAMA[1], **Oussama BEN-AMMAR**[2], **Alexandre DOLGUI**[1], **Faouzi MASMOUDI**[3]
[1] IMT Atlantique, LS2N-CNRS, La Chantrerie, 4 rue Alfred Kastler - B.P. 20722, 44307 Nantes, France
{ilhem.slama,alexandre.dolgui}@imt-atlantique.fr
[2] Mines Saint-Étienne, Univ Clermont Auvergne, UMR-CNRS 6158 LIMOS
CMP Department of Manufacturing Sciences and Logistics
880 route de Mimet, F-13541 Gardanne, France
oussama.ben-ammar@emse.fr
[2] Engineering School of Sfax, LA2MP
University of Sfax, Tunisia
masmoudi.fawzi@gmail.com

RÉSUMÉ : *Le processus de démontage a suscité un intérêt croissant en raison de préoccupations écologiques croissantes. Dans ce travail préliminaire, nous étudions le problème de planification de désassemblage de Produits en Fin de Vie (PFVs). Nous tenons compte de plusieurs éléments comme l'approvisionnement externe, les articles défectueux, la rupture de stock, les délais d'installation et la disponibilité d'une capacité supplémentaire de désassemblage. L'objectif est de déterminer le nombre de PFVs à démonter à chaque période afin de maximiser le prix de revente d'articles récupérés et de minimiser un ensemble de coûts lié au processus de démontage. Le problème est modéliser sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers (PLNE) et résolu avec le solveur CPLEX. Un exemple numérique est présenté pour illustrer le problème étudié.*

MOTS-CLÉS : *Logistique inverse, désassemblage, planification, articles défectueux, contrainte de capacité.*

1 INTRODUCTION

Le problème de planification de désassemblage se focalise sur l'étude d'un produit que l'on désassemble pour obtenir d'articles destinés à la revente. Dans la plupart des cas, il existe une demande en composants à satisfaire. L'objectif est de déterminer la quantité de PFV à désassembler à chaque période.

Dans ce travail, nous nous référons au modèle de planification de type RMRP (Reverse Materiel Requirement Planning) pour souligner qu'il s'agit d'un modèle de minimisation des coûts pour la planification du désassemblage sous une contrainte sur la capacité. Nous formulons le problème sous forme d'un PLNE qui maximise le profit tiré du processus de démontage. Autrement dit, la différence entre les revenus générés par la revente d'articles récupérés et les coûts liés au processus de démontage d'un seul type de produit. La planification est faite sur plusieurs périodes pour un système de désassemblage multi-niveau.

Le modèle proposé intègre le rejet des composants, le stockage et la rupture en composants, et les temps de configuration. Une décision d'achat externe est également considérée afin de satisfaire toutes les demandes en proposant le bon compromis entre le désassemblage et l'approvisionnement externe en composants. Dans les sections suivantes, tous ces paramètres seront présentés, modélisés et expliqués. A notre connaissance, c'est pour la première fois que tous ces paramètres sont traités simultanément dans un problème de type RMRP déterministe. Le modèle proposé fournit les quantités optimales de PFVs à démonter ainsi que la quantité d'articles à s'approvisionner en externe pour satisfaire toutes les demandes de l'horizon de planification.

2 ÉTAT DE L'ART

Depuis les travaux précurseurs de Gupta and Taleb (1994), le problème de planification de désassemblage a suscité beaucoup d'attention. Afin de ne pas faire une étude exhaustive de la littérature, nous allons se limiter aux études pertinentes qui restreignent la capacité de démontage. D'après notre récente étude bibliographique (Slama et al., 2019), ces travaux peuvent être classés par type de produit.

Pour un système de démontage avec un seul type de produit, Lee et al. (2002) étaient les premiers à étudier le problème déterministe avec une limitation de capacité de désassemblage. Les auteurs ont proposé

un programme en nombres entiers qui vise à minimiser la somme des coûts de stockage des composants et des coûts liés aux opérations de démontage et d'approvisionnement en PFVs. Une année plus tard, Kim et al. (2003) ont prouvé que la solution optimale est identique que celle trouvée en relâchant la contrainte sur la capacité. Ensuite, Kim et al. (2006) ont étendu le modèle proposé par Lee et al. (2002) en ajoutant des coûts d'installation fixes générés sur l'horizon de planification une fois l'opération de désassemblage est lancée. En règle générale, les coûts d'installation ont tendance à être substantiels dans les processus de démontage réels. Les auteurs ont suggéré une heuristique lagrangienne pour résoudre le problème avec des tests sur des instances de grande taille.

Pour un système de démontage avec plusieurs type de produit, Ullerich and Buscher (2013) ont présenté un programme linéaire en nombres entiers pour étudier le cas d'une nomenclature à deux niveaux avec des similitudes de pièces. Cependant, leur modèle a ignoré le coût d'installation, qui est un paramètre essentiel pour le problème de lot-sizing. Ji et al. (2016) ont étendu le travail de Ullerich and Buscher (2013) en introduisant à la fois les coûts d'installation et de démarrage. Les auteurs ont proposé une heuristique efficace pour résoudre le problème. En raison des écarts entre les rendements de désassemblage et les demandes en composants, une introduction d'un stock au début de l'horizon a été suggérée. Le problème de la conservation inutile des composants est traité par Godichaud et al. (2015); Godichaud and Amodeo (2019, 2018). Une solution basée sur l'achat externe des composants est proposée. Tian and Zhang (2019) ont étudié le problème de lot-sizing et la tarification des produits en fin de vie en utilisant des rendements liés aux prix d'acquisition des produits. Le problème a été résolu par optimisation de colonies de fourmis pour déterminer les meilleurs prix d'achat des éléments racines ainsi que le meilleur plan de désassemblage. Récemment, Slama et al. (2020) ont développé un nouveau modèle de programmation en nombres entiers mixtes (PMNE) pour maximiser les revenus du processus de démontage pour un système de désassemblage avec un type de produit avec une nomenclature à plusieurs niveaux et des composant en commun.

Concernant la restriction de capacité sur les ressources de désassemblage, Plusieurs études ont démontré qu'elle augmente la complexité du problème (Kim et al., 2006; Kim and Xirouchakis, 2010; Kim et al., 2009). Cependant, aucune étude n'a considéré le temps de configuration nécessaires pour préparer le processus de désassemblage. Le temps d'installation est généralement un paramètre indispensable dans les problèmes de lot-sizing. Il doit être intégré dans la contrainte de capacité même si cela augmente considérablement la complexité du problème (Kim et al., 2007).

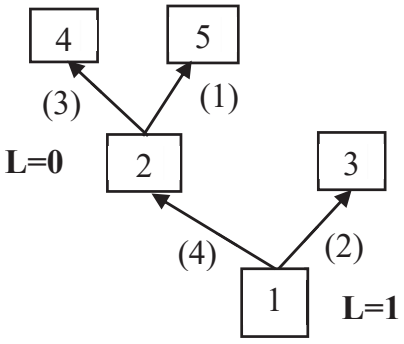


FIGURE 1 – Système de démontage : exemple illustratif.

Dans ce travail préliminaire, nos contributions sont les suivantes : (i) nous introduisons à la fois le temps d'installation et la capacité de désassemblage, et (ii) nous tenons compte des composants défectueux, de la rupture de stock et de l'achat externe des composants.

3 DESCRIPTION DU PROBLÈME

Dans ce travail, nous considérons un seul type de PFV. Ce produit a une nomenclature à plusieurs niveaux (voir l'exemple dans la Figure 1). Un article parent représente l'élément à démonter, il peut être un élément racine ou un élément intermédiaire (sous-ensemble). Un article parent a plusieurs enfants. Chaque élément enfant désigne un élément non-racine qui peut avoir un seul parent. Comme le montre la Figure 1, l'élément 1 désigne l'élément racine. Les éléments 2 et 3 représentent les sous-ensembles et les éléments 4 et 5 représentent les pièces. De même, le nombre entre parenthèses représente le nombre d'unités de l'article obtenu lorsqu'une unité de son parent est démontée ; par exemple, l'article 2 est démonté en trois unités d'article 4 et une unité d'article 5. Le délai de démontage (L) comprend le temps écoulé entre le lancement de l'ordre de démontage et la réception d'articles démontés.

La capacité de démontage est supposée limitée à chaque période. Une capacité supplémentaire peut être ajoutée si le plan de démontage l'exige. Un exemple classique est d'utiliser les heures supplémentaires. Nous supposons que l'utilisation de ces heures est limitée.

Les clients ont des demandes d'articles démontés (sous-ensemble ou pièces) sur l'horizon de planifi-

cation. Toutes ces demandes doivent être satisfaites soit en démontant les produits en fin de vie, soit les achetant directement afin d'éviter tout désassemblage avec une pénalité élevée dans la fonction objectif. Par ailleurs, toute rupture engendre une pénalité. Un article non-racine est en rupture de stock si la demande ne peut être satisfaite à la période souhaitée. Nous notons que l'achat des composants auprès d'un prestataire est fait seulement si le coût de revient d'un composant issu du désassemblage est supérieur à son coût d'achat chez un prestataire. Nous notons que la solution proposée par le modèle propose un bon compromis entre l'achat et le désassemblage. Concernant le taux de rejet de chaque article, il est connu et concerne seulement les articles non-racine.

Le coût de stockage se produit lorsque les éléments non-racine sont conservés en stock pour répondre à une demande future. Le coût et le temps d'installation des machine sont supposés non nuls. Une fois qu'un élément parent est démonté, l'équipement de désassemblage nécessaire pour cet élément doit être configuré. Cela génère un coût d'installation spécifique à chaque élément parent. Le temps d'installation est généralement un paramètre indispensable dans les problèmes de lot-sizing. Il est défini comme le temps nécessaire pour préparer le processus de désassemblage. Nous notons aussi que le temps d'installation pour les opérations de désassemblage manuel est souvent long, il doit être intégré dans la contrainte de capacité.

Les hypothèses du problème étudié peuvent être résumées comme suit :

a) Les demandes pour les éléments non-racine sont connues,
b) Les demandes peuvent être satisfaites par l'opération de démontage et/ou par les achats externes,
c) Le retard sur les demandes est autorisé,
d) Les articles démontés peuvent être défectueux,
e) Le temps d'opération de démontage et le temps de configuration pour tous les articles parents sont non nuls,
f) Le démontage est complet, ce qui signifie que tous les articles parents sont démontés,
g) La capacité de désassemblage et l'utilisation des heures supplémentaire sont limitées.

4 FORMULATION MATHÉMATIQUE

Dans cette section nous présentons un modèle mathématique pour formuler le problème de planification du démontage étudié. L'objectif est de trouver le meilleur plan de démontage qui satisfait toutes les demandes en composants en minimisant les coûts et en maximisant le profit.

Dans ce travail préliminaire, nous proposons une nouvelle formulation du problème par rapport à celle présentée dans la littérature. Afin de minimiser le nombre de contraintes, nous fusionnons les équations de niveau de stock des sous-ensembles et d'articles du dernier niveau en une seule contrainte de stockage. Ces techniques sont inspirées des travaux de Voß and Woodruff (2006) dans lesquels les auteurs étudient les problèmes de planification de la production dans un environnement MRP (Material Requirements Planning).

Pour formuler le problème, l'ordre topologique est considéré de gauche à droite et de bas en haut pour tous les éléments. Soit $i = 1$ l'indice du PFV et N l'indice du dernier article démonté obtenu. Soit les trois ensembles suivants : (i) $\mathcal{N}$ l'ensemble d'articles i avec $i = 1, \ldots, i_l, \ldots, N$, où i_l désigne l'indice du premier élément feuille. (ii) $\mathcal{A}$ l'ensemble des éléments feuille i du dernier niveau de nomenclature qui ne peuvent plus être démontés avec $i = i_l, \ldots, N$. Ces éléments vérifient l'égalité suivante : $\forall i \in \mathcal{A}, \forall j \in \mathcal{N} \mid R_{i,j} = 0$, et (iii) $\mathcal{A}^C$ l'ensemble des éléments restants i avec $\mathcal{A} \cup \mathcal{A}^C = \mathcal{N}$ où $i = 2, \ldots, i_{l-1}$. Pour faciliter la lecture du modèle, nous introduisons une macro, notée $\equiv$, pour indiquer le niveau de stock pour chaque élément non-racine à la fin de chaque période.
Les indices utilisées dans la notation sont :

— t : indice de la période t, $t \in \mathcal{T}$,
— i : indice de l'article i, $i \in \mathcal{N}$.

Les paramètres utilisés dans ce travail sont :

— $\mathcal{T}$: ensemble de périodes,
— $\mathcal{N}$: ensemble d'articles,
— $\mathcal{A}$: ensemble d'articles du dernier niveau,
— $\mathcal{A}^{\mathcal{C}}$: ensemble des sous-ensembles (niveaux intermédiaires),
— $R_{i,j}$: nombre d'unités de l'article j issus du démontage de i,
— $D_{i,t}$: demande externe en i à la période t
— $I_{i,0}$: niveau de stock initial de l'article i,
— L_i : délai de désassemblage de l' article i,
— h_i : coût unitaire de stock de l'article i,
— S_i : coût unitaire d'installation de l'article i,
— ϕ_i : parent de l'article i,
— b_i : coût unitaire de rupture en article i,
— C_i : coût unitaire d'achat de l'article i,
— α_i : taux de rejet pour l'article i,
— G_i : temps de l'opération de l'article i,
— U_t : capacité disponible à la période t ,

— O_t : coût de l'ajout d'une unité de capacité supplémentaire à la période t,
— F_t : capacité des heures supplémentaires à la période t,
— SC_i : prix unitaire de vente de l'article i,
— ST_i : temps d'installation de l'élément parent i,
— M : un grand nombre.

Les variables de décisions sont :

— $X_{i,t}$: quantité de i à démonter à la période t,
— $Z_{i,t}$: quantité de i achetée à la période t.

Les variables suivantes sont utilisées dans ce travail :

— $\delta_{i,t}$: indicateur binaire de démontage de i à t,
— $I^+_{i,t}$: niveau de stock de i à la fin de t,
— $I^-_{i,t}$: quantité en rupture de i à la fin de t,
— $W_{i,t}$: quantité défectueuse de i à la période t,
— O_t : heures supplémentaires utilisées à t,
— $Q_{i,t}$: quantité de vente de i à la période t.

Le modèle est formulé en tant que PLNE. La fonction objectif (équation 1) maximise le profit total tout en minimisant plusieurs coûts : stockage, rupture, achats externes, installation et dépassement de la capacité sur l'horizon de planification :

$$Max \sum_{t\in\mathcal{T}}\Big(\sum_{i\in\mathcal{N}_{\setminus\{1\}}} (SC_i.Q_{i,t} - h_i.I^+_{i,t} - b_i.I^-_{i,t} - C_i.Z_{i,t}) - O_t.Y_t - \sum_{i\in\mathcal{A}^C} S_i.\delta_{i,t}\Big) \tag{1}$$

Les contraintes (2) définissent le niveau de stock pour chaque article non-racine i à la fin de t :

$$I^+_{i,t} - I^-_{i,t} = I_{i,t} \qquad \forall i \in \mathcal{N}_{\setminus\{1\}}, \forall t \in \mathcal{T} \tag{2}$$

où $I_{i,t}$ est la macro définie comme suit :

$$I_{i,t} \equiv I_{i,t-1} + R_{\phi_i,i}.X_{\phi_i,t-L_{\phi i}} - D_{i,t} - X_{i,t} - W_{i,t} + Z_{i,t}$$

Les contraintes (3) garantissent qu'un coût d'installation est généré dans une période si une opération de démontage doit être effectuée pendant cette période :

$$\delta_{i,t} - \frac{X_{i,t}}{M} \geq 0 \qquad \forall i \in \mathcal{A}^C, \forall t \in \mathcal{T} \tag{3}$$

Les contraintes (4) représentent la quantité défectueuse pour chaque article non-racine i à chaque t :

$$W_{i,t} = \alpha_i \times R_{\phi_i,i}.X_{\phi_i,t-L_{\phi i}} \qquad \forall i \in \mathcal{N}_{\setminus\{1\}}, \forall t \in \mathcal{T} \tag{4}$$

Les contraintes (5) définissent la capacité de démontage à chaque période t :

$$\sum_{i\in\mathcal{A}^C} (ST_i.\delta_{i,t} + G_i.X_{i,t}) \leq U_t + Y_t \qquad \forall t \in \mathcal{T} \tag{5}$$

Les contraintes (6) représentent les limites inférieures et supérieures disponibles pour une capacité supplémentaire à chaque période t :

$$0 \leq Y_t \leq F_t \qquad \forall t \in \mathcal{T} \tag{6}$$

Les contraintes (7) représentent la quantité vendue pour chaque article non-racine i et la période t :

$$Q_{i,t} = (D_{i,t} - Z_{i,t} - I_{i,t}) \qquad \forall i \in \mathcal{N}_{\setminus\{1\}}, \forall t \in \mathcal{T} \tag{7}$$

Les contraintes (8-13) définissent les variables de décision :

$$I^+_{i,t}, I^-_{i,t} \geq 0 \qquad \forall i \in \mathcal{N}_{\setminus\{1\}}, \forall t \in \mathcal{T} \tag{8}$$
$$Z_{i,t}, Q_{i,t}, W_{i,t} \geq 0 \qquad \forall i \in \mathcal{N}_{\setminus\{1\}}, \forall t \in \mathcal{T} \tag{9}$$
$$X_{i,t} \geq 0 \qquad \forall i \in \mathcal{A}^C, \forall t \in \mathcal{T} \tag{10}$$
$$X_{i,t} = 0 \qquad \forall i \in \mathcal{A}, \forall t \in \mathcal{T} \tag{11}$$
$$Y_t \geq 0 \qquad \forall t \in \mathcal{T} \tag{12}$$
$$\delta_{i,t} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in \mathcal{A}^C, \forall t \in \mathcal{T} \tag{13}$$

Le modèle proposé permet de décider :

1. Quand et combien d'articles parents doivent être démontés, en tenant compte du fait que le processus de démontage génère des pièces défectueuses ?
2. Quand et combien d'articles non-racines doivent être achetés en externe ?

5 Illustration avec un exemple

Le solveur CPLEX v.12.6 a été utilisé pour résoudre de manière optimale le PLNE. Toutes les formulations ont été codées en C avec un processeur Intel (R) Core ™ i7-5500 CPU @ 2.4 GHz.

Pour présenter la solution optimale trouvée sur une petite instance et sur la structure du produit illustré dans la Figure 1, nous considérons un horizon de planification de 5 périodes. Nous supposons que le temps de l'opération de démontage G_i et d'installation ST_i sont respectivement 5 et 30 pour chaque article i, $\forall i \in \mathcal{A}^C$. Le tableau 1 résume, pour chaque période t, la demande en composants, le taux de rejet, la capacité de désassemblage et le nombre maximale d'heures supplémentaires qu'on peut allouée, ainsi que les différents coûts unitaires.

Le tableau 2 présente la solution optimale sous forme de plan directeur de démontage. Le coût optimale est égale 12836 et trouvé en 0.047 secondes.

6 Conclusion

Dans ce travail préliminaire, une modélisation déterministe qui consiste à étendre les problèmes examinés dans la littérature à un problème plus général. Nous avons considéré un seul type de produit avec une

Tableau 1 – Caractéristiques de l'ensemble des données

Demande					
Période t Composant i	1	2	3	4	5
2	41	85	72	38	80
3	69	65	68	96	22
4	49	67	51	61	63
5	87	66	24	80	83
Taux de rejet					
Article i	1	2	3	4	5
α_i	0	0,02	0	0,03	0
Capacité de désassemblage					
Période t	1	2	3	4	5
U_t	480	480	480	480	480
Capacité en heures supplémentaires					
Période t	1	2	3	4	5
F_t	120	120	120	120	120
Coûts unitaires					
Article i	1	2	3	4	5
h_i	-	8	5	6	5
S_i	20	20	-	-	-
A_i	-	16	10	12	10
SC_i	-	42	7,5	9	7,5
C_i	-	63	11,25	13,25	11,25

Tableau 2 – Solution optimale obtenue par CPLEX

Quantités de PFVs à désassembler						
Période t	0	1	2	3	4	5
$X_{1,t}$	**20**	**25**	**25**	**11**	**25**	
$X_{2,t}$		**17**	**22**	**17**	**20**	**21**
Quantités à acheter						
Période t	0	1	2	3	4	5
$Z_{2,t}$						
$Z_{3,t}$		**33**	**25**	**33**	**57**	
$Z_{4,t}$						
$Z_{5,t}$		**70**	**44**	**7**	**60**	
Niveaux de stock						
Période t	0	1	2	3	4	5
$I^+_{2,t}$		22	8	16	2	1
$I^+_{3,t}$						
$I^+_{4,t}$		2	1	1		
$I^+_{5,t}$						
Niveaux de rupture						
Période t	0	1	2	3	4	5
$I^-_{2,t}$			12	4		
$I^-_{3,t}$					28	
$I^-_{4,t}$						
$I^-_{5,t}$						62
Quantités vendues						
Période t	0	1	2	3	4	5
$Q_{2,t}$		41	73	68	38	80
$Q_{3,t}$		36	40	35	39	22
$Q_{4,t}$		49	67	51	61	63
$Q_{5,t}$		17	22	17	20	21
Heures supplémentaire						
Période t	0	1	2	3	4	5
Y_t	0	0	0	0	0	0

nomenclature multi-niveau. Le modèle mathématique a été construit en supposant que les demandes sont connues pour chaque article non-racine à chaque période. La décision d'approvisionnement en externe et l'autorisation de la rupture sont autorisées. les temps d'installation et la capacité en heures supplémentaires sont prises en considération. Les articles démontés peuvent être rejetés lors de l'opération de désassemblage. Un PLNE a été proposé pour formuler et résoudre de manière optimale le problème étudié. Un exemple numérique est présentée. C'est une petite instance avec un système de démontage composé de 5 articles et un horizon de planification de 5 périodes.

Comme continuité de cette étude nous envisagerons les perspectives suivantes. Tout d'abord, pour montrer l'extensibilité et les limites du modèle proposé, plusieurs tests de performance devront être menés sur des moyennes et grandes. Ensuite, la prise en compte de l'existence de plusieurs types de produits à démonter avec plusieurs articles en commun. Enfin, afin de se rapprocher des cas réels, nous compterons étudier les systèmes de désassemblage dans un environnement incertain.

Références

Godichaud, M. and Amodeo, L. (2018). Economic order quantity for multistage disassembly systems. *International Journal of Production Economics*, 199 :16–25.

Godichaud, M. and Amodeo, L. (2019). Eoq inventory models for disassembly systems with disposal and lost sales. *International Journal of Production Research*, 57(18) :5685–5704.

Godichaud, M., Amodeo, L., and Hrouga, M. (2015). Metaheuristic based optimization for capacitated disassembly lot sizing problem with lost sales. In *2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, pages 1329–1335. IEEE.

Gupta, S. and Taleb, K. (1994). Scheduling disassembly. *The International Journal of Production Research*, 32(8) :1857–1866.

Ji, X., Zhang, Z., Huang, S., and Li, L. (2016). Capacitated disassembly scheduling with parts commo-

nality and start-up cost and its industrial application. *International Journal of Production Research*, 54(4) :1225–1243.

Kim, H.-J., Lee, D.-H., and Xirouchakis, P. (2006). A lagrangean heuristic algorithm for disassembly scheduling with capacity constraints. *Journal of the Operational Research Society*, 57(10) :1231–1240.

Kim, H.-J., Lee, D.-H., and Xirouchakis, P. (2007). Disassembly scheduling : literature review and future research directions. *International Journal of Production Research*, 45(18-19) :4465–4484.

Kim, H.-J., Lee, D.-H., Xirouchakis, P., and Kwon, O. (2009). A branch and bound algorithm for disassembly scheduling with assembly product structure. *Journal of the Operational Research Society*, 60(3) :419–430.

Kim, H.-J., Lee, D.-H., Xirouchakis, P., and Züst, R. (2003). Disassembly scheduling with multiple product types. *CIRP Annals*, 52(1) :403–406.

Kim, H.-J. and Xirouchakis, P. (2010). Capacitated disassembly scheduling with random demand. *International Journal of Production Research*, 48(23) :7177–7194.

Lee, D.-H., Xirouchakis, P., and Zust, R. (2002). Disassembly scheduling with capacity constraints. *CIRP Annals*, 51(1) :387–390.

Slama, I., Ben-Ammar, O., Dolgui, A., and Masmoudi, F. (2020). New mixed integer approach to solve a multi-level capacitated disassembly lot-sizing problem with defective items and backlogging. *Journal of Manufacturing Systems*, 56 :50–57.

Slama, I., Ben-Ammar, O., Masmoudi, F., and Dolgui, A. (2019). Disassembly scheduling problem : literature review and future research directions. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13) :601–606.

Tian, X. and Zhang, Z.-H. (2019). Capacitated disassembly scheduling and pricing of returned products with price-dependent yield. *Omega*, 84 :160–174.

Ullerich, C. and Buscher, U. (2013). Flexible disassembly planning considering product conditions. *International Journal of Production Research*, 51(20) :6209–6228.

Voß, S. and Woodruff, D. L. (2006). *Introduction to computational optimization models for production planning in a supply chain*, volume 240. Springer Science & Business Media.

13th *International Conference on Modeling, Optimization and Simuation* - MOSIM*'20 - November 12-14, 2020*
Agadir - Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

Multi-period Multi-item Lot sizing under Random Yield and Stochastic Capacity

Mehrnoosh MOHAMMADI, Simon THEVENIN, Alexandre DOLGUI
IMT Atlantique, LS2N, UMR-CNRS 6004
Nantes, France
m.mohammadi94@ut.ac.ir, simon.thevenin@imt-atlantique.fr, alexandre.dolgui@imt-atlantique.fr

ABSTRACT: *This study addresses a multi-item multi-period lot-sizing problem with stochastic yield and capacity. Typically, the random yield is the result of defective items, whereas the capacity is uncertain due to machine breakdowns. Considering both stochastic yield and capacity leads to a complex problem since these two uncertainty types are in conflict. Indeed, the planners tend to produce large batches to overcome random yields, but the resulting plan might not be feasible due to random capacity. We provide an analytical expression for the service level function. and a dynamic programming algorithm to find the optimal released quantities.*

KEYWORDS: *Lot-sizing, Uncertainties, Random yield, Random capacity, Stochastic production planning.*

1 INTRODUCTION

To respond to today's competitive business world, companies tend to increase the size of their product assortments, launch new products frequently, and adjust their production processes constantly (acquire new equipment). In these conditions, production systems can become very difficult to manage due to the lack of regularity and consistency in the production process, and it becomes difficult for manufacturers to ensure product-process quality. To face these challenges, inventory control systems must be able to cope with uncertainties from both process (e.g., equipment failure) and product quality. In inventory control, machine breakdowns lead to stochastic resource capacity, whereas bad product quality leads to random yield.

One of the first studies on inventory control with imperfect item quality and its effect on production run time and economic production quantity (EPQ) was (Karlin et al. 1958). However, despite the large number of works following this seminal work, there is a lake of study considering both random yield and capacity. The joint consideration of these uncertainties is critical since they are conflicting. Indeed, companies tend to produce large lot-size to hedge against yield uncertainty. This large lot sizes lead to a tight usage of the production capacity, which is not desirable when the capacity is unknown.

The only works considering jointly these two types of uncertainties are limited to single-period models (Schemeleva et al. 2018). However, in practice, companies manage their production plan with a frozen horizon to avoid nervousness, and the production quantities must be decided for a given planning horizon. In this multi-periods context, the uncertainties in a period result in over and under productions that affect future periods. The existing single period model cannot be applied successively in each period, because the uncertainty leads to backlog or inventory.

This work presents a mathematical analysis of the multi-item lot-sizing problem under stochastic yield and capacity. This analysis leads to the definition of the service level function that incorporates the probabilistic backlog/inventory from one period to the next. In addition, during the talk, we will present a dynamic programming algorithm to find the optimal released quantities, along with some efficient speed up strategies.

The rest of this study is as follows. Section 2 reviews the literature, Section 3 introduces the considered problem and gives the proposed mathematical model, and Section 4 gives the mathematical analysis. Finally, Section 5 briefly summarizes the approaches that will be presented in this talk.

2 LITERATURE REVIEW

Inventory control plays a crucial role in the management of a production system since it impacts customer satisfaction and supply chain costs. Indeed, an improper inventory policy may lead to shortages of products or needless stocks, and both are costly for companies. Therefore, there is a significant motivation for developing efficient and cost-effective inventory policies/methods.

There is a vast literature on lot-sizing problems under

uncertainty, and various uncertain parameters have been considered, such as demand, yield, lead time, or capacity. Review papers on this topic include (Aloulou et al. 2014; Dolgui and Prodhon 2007; Yano and Lee 1995). In the recent review of (Aloulou et al. 2014) on non- deterministic lot-sizing models, the authors classified such problems based on the number of periods, the number of products, the number of machines, the uncertain parameters, and the modeling approaches. The present work focuses on multi-period, multi-product, single-machine, under uncertain yield and capacity. Therefore, the review below focuses on these two types of uncertainties.

Since the seminal paper of (E. Silver 1976), which extends the traditional EOQ model to yield uncertainty, an extensive amount of research has been done on lot-sizing problems with random yields (e.g., Gerchak and Grosfeld-Nir 1998; Gerchak et al. 1994; Inderfurth 2009; Khan et al. 2010; Yano and Lee 1995). There exist three approaches to represent random yield in a production context. The first stream of research (e.g., Agnihothri et al. 2000; Dolgui and Proth 2010; Haji et al. 2008; Li et al. 2008; Papachristos and Konstantaras 2006; Wang and Gerchak 2000) considers that the fraction of defective items is known, and the problem is deterministic. The second stream of research (e.g., Singh et al. 1988; Teunter and Flapper 2003) represents random yield with a Bernoulli process, where a certain fraction of goods is defective, and the number of defective items depends on the lot size. The third research stream (e.g., Maddah and M. Y. Jaber 2008; Salameh and M. Jaber 2000) models random yield with a geometric distribution, where the manufacturing system becomes out of control with a given probability, and all produced items are defective. However, yield uncertainty does not necessarily result from bad product quality, but it can also arise due to shortages from the suppliers (e.g., Güllü et al. 1999; Moon et al. 2012).

Random capacity is a practical issue in different types of industries, such as high-tech industries like the semiconductor industry (Geng and Jiang 2007). (Wang and Gerchak 1996a) illustrates the possible impacts of variable capacity on the optimal solution in the continuous lot-sizing problem. The uncertainty on the capacity has various causes, such as unexpected breakdowns, unplanned maintenance, material shortages, uncertain repair durations when the repair is planned, or strikes (Ciarallo et al. 1994; Wang and Gerchak 1996a). Among these causes, machine breakdowns attracted the most attention in the literature (e.g., Chakraborty et al. 2009; Chiu 2010; Giri and Dohi 2004; Lin and Gong 2006). The mathematical modeling of machine breakdown is usually based on two factors, namely the meantime to/between failure (MTTF/MTBF) and mean time to repair. For instance, (Lin and Gong 2006) considered the EPQ model with random breakdowns and constant repair times. Similarly, (Giri and Dohi 2004; Giri and Yun 2005) examined the optimal lot-sizing problem with at most two failures during the planning period (both failures and repair times follow a general (arbitrary) distribution.

Very few papers (Dolgui et al. 2005; Jain and E. A. Silver 1995; Schemeleva et al. 2018, 2012; Wang and Gerchak 1996b) consider simultaneously random yields and capacity. (Wang and Gerchak 1996b) proposed a stochastic dynamic programming approach for the single item case. (Jain and E. A. Silver 1995) investigated the case where suppliers allow to reserve a dedicated capacity level by paying a premium charge. This assumption leads to the independence between the optimal order size and random capacity. (Dolgui et al. 2005) study a sequencing and lot-sizing problem for a multi-item single-period production system under uncertainties. The goal of their problem is to maximize service level, and they propose a dynamic programming approach. This work was extended in (Schemeleva et al. 2012) and (Schemeleva et al. 2018), where the authors propose a memetic algorithm for the lot sizing (production planning) part and a heuristic method able to solve the integrated lot-sizing and sequencing problem.

To conclude this literature review, despite its relevance in practice, very few studies considered random yield and capacity simultaneously. As these two types of uncertainty conflict, it is crucial to manage them simultaneously. Indeed, companies tend to produce more than required to overcome random yield issues, but a random capacity should not be used tightly. The few studies on lot-sizing with random yield and capacity are limited to one period. To the best of our knowledge, the multi-period multi-item lot-sizing problem with random yield and capacity uncertainties has never been studied in the literature.

3 PROBLEM STATEMENT

This section gives a formulation of the considered problem. Table 1 summarizes the notations used in the rest of the paper. Note that we adopt the following convention. $M_{1...m,1...n}$ denotes a $m \times n$ matrix, $M_{i,1...n}$ (resp. $M_{1...m,i}$) denotes the i^{th} lines(resp. column) denotes the i^{th} lines, and $M_{i,j}$ denotes an elements of the matrix. Finally, $M_{i,1\rightarrow n}$ denotes the sum of the components in the vector $M_{i,1...n}$.

We consider a multi-item multi-period lot-sizing problem with stochastic yield and stochastic capacity. Given the demand D_{it} for each item i in period t of the planning horizon, the considered problem is to determine the production quantity x_{it} to released for each item i in each period t, to maximize the service level.

$i = 1, ..., n$	Index for items
$t = 1, ..., T$	Index for period
p_i	Probability to produce a good item of type i
k_i	Capacity consumption per unit of item i
C	Production capacity per period
D_{it}	Demand of item i in period t
$1/U$	Mean time between failures
$1/\bar{U}$	Mean time to repair
$\gamma_{1...n}$	Vector of the items sequence
$R_{1...t}$	Repair time from period 1 to t
$x_{1...n,1...T}$	Matrix of released quantities for all items and all periods
$y_{1...n,1...T}$	Matrix of processed quantities for all items and all periods
$z_{1...n,1...T}$	Matrix of produced quantities for all items and all periods
$P^b_{it}(\widetilde{D}_{it}\|x_{1...i1...t-1})$	Probability to have a total demand $\widetilde{D}_{it}$ (including backlog and inventory) in period t given the released quantities.
$p(z_{it} \geq \widetilde{D}_{it}\|x_{1...i,1...t})$	Probability to meet the demand given the released quantities.
$p^{y=}_{it}(z_{it}\|y_{it})$	Probability to yield exactly z_{it} good quality items, given the processed quantities
$p^{y>}_{it}(z_{it}\|y_{it})$	Probability to yield at least z_{it} good quality items, given the processed quantities
$p^{c=}_{it}(y_{it}\|x_{1...it})$	Probability to process exactly y_{it} item i in period t given the released quantities.
$p^{c>}_{it}(y_{it}\|x_{1...it})$	Probability to process at least y_{it} item i in period t given the released quantities.
$p^{cy=}_{it}(z_{it}\|x_{it})$	Probability to yield exactly z_{it} good quality items, given the released quantities
$p^{cy>}_{it}(z_{it}\|x_{it})$	Probability to yield at least z_{it} good quality items, given the released quantities
$p^r(R \leq \bar{K}\|K)$	Probability to have a repair time R lower than $\bar{K}$, with a required operation time K.

Table 1 – Notations

The production must respect the capacity C of the bottleneck resource, and the production of one unit of item i consumes k_i time of capacity. However, the machine can breakdown during operation, and it becomes unusable during a random repair time. Similarly to (Dolgui et al. 2005), we assume that the failure and repair incidents follow independent exponential distributions, with mean time between failures $1/U$ and mean time to repair $1/\bar{U}$.

In addition, the machine can produce defective items. More precisely, we assume that each item i is of good quality with probability p_i. Therefore, the actual produced quantity y_{it} is lower than or equal to the released quantity x_{it}.

Because of these uncertainties, the produced quantity might not meet the demand, and there can be backlog and inventory. In other words, the unmet demand in period t can be met in period $t + 1$.

The decision framework assumes that the production quantities are decided for the entire horizon, and they are frozen. In this study, we consider a single production line that operates with a lot for lot policy to satisfy the demand for each item in each period. Because of machine breakdowns, the production plan might not be realizable. In particular, there might not be enough capacity to process the last items. Consequently, the production sequence impacts the service level. In the present work, we assume that daily the production sequence is given by a precedent decision step. Multiple works in literature propose methods to schedule the production sequence (e.g., Dolgui et al. 2005; Schemeleva et al. 2018, 2012).

In the rest of this paper, we make a distinction between the quantity released, processed and produced. The *released* quantities ($x_{1...n,1...t}$) is the amount of item the planner asked to produced. The quantity *processed* ($y_{1...n,1...t}$) is the quantity that can be process by the machine with its actual capacity. The quantity *produced* ($z_{1...n,1...t}$) is the amount of item processed that are of good quality.

The objective is to maximize the service level S, which is defined as the probability to meet the demand for all items in all period. That is

$$S = \prod_{i=1}^{n} \prod_{t=1}^{T} p(z_{i1\to t} \geq D_{i1\to t}|x_{1...i1...t}), \qquad (1)$$

where $p(z_{i1\to t} \geq D_{i1\to t}|x_{1...i1...t})$ is the probability to have a total produced quantities $z_{i1\to t}$ from period 1 to t larger than the total demand in these periods.

4 MATHEMATICAL ANALYSIS

The service level can be decomposed based on three stochastic parameters

$$p(z_{i1\to t} \geq D_{i1\to t}|x_{1\ldots i1\ldots t}) = \sum_{\widetilde{D}_{it}=D_{i1\to t}-x_{i1\to t-1}}^{D_{i1\to t}} (p^b_{it}(\widetilde{D}_{it}|x_{1\ldots i1\ldots t-1}) (\sum_{\widetilde{y}_{it}=0}^{x_{it}} p^{y>}_{it}(\widetilde{D}_{it}|y_{it}) \times p^{c=}_{it}(y_{it}|x_{1\ldots it}))), \quad (2)$$

where $p(z_{it} \geq \widetilde{D}_{it}|y_{it})$ is the probability to produce at least $\widetilde{D}_{it}$ good items of type i given that y_{it} items of type i are processed in period t, $p^{c=}_{it}(y_{it}|x_{1\ldots it})$ is the probability to process y_{it} given the quantity released in period t, and $p^b(\widetilde{D}_{it}|x_{1\ldots i1\ldots t-1})$ is the probability to have a total demand $\widetilde{D}_{it}$ (including backlog and inventory) in period t .

This function maximizes the probability of meeting the demand of item i from period one to the period t when all $i-1$ released quantities are planned. The total demand $\widetilde{D}_{it}$ can vary from $D_{i1\to t} - x_{i1\to t-1}$ to $D_{i1\to t}$. The lower bound corresponds to the case where all released items have good quality, and there some inventory from the previous periods, whereas the upper bound corresponds to the case where there is a large backlog.

Note that for the first period, as there is no variation for the total demand (it is fixed to the initial demand), the external summation is replaced by $\widetilde{D}_{it}$ with D_{it}.

Basically, the larger are the sizes of the lots, the larger is the value of $p^y_{it}(z_{it} \geq \widetilde{D}_{it}|y_{it})$, and the smaller is $p^{c=}_{it}(y_{it}|x_{it})$ since there may be less capacity to produce the last lots.

We detail below the computation of these three probability functions.

4.1 Yield uncertainty

The probability to $p^y_{it}(z_{it}|y_{it})$ to yield exactly z_{it} good quality items when y_{it} items i are processed can be computed with Bernoulli formula:

$$p^{y=}_{it}(z_{it}|y_{it}) = C^{z_{it}}_{y_{it}}(1-p_i)^{(y_{it}-z_{it})}p_i^{z_{it}}, \quad (3)$$

where p_i is the probability to produce a good quality item.

The probability to yield more than z_{it} item i in period t if y_{it} items are processes is

$$p^{y>}_{it}(z_{it}|y_{it}) = \sum_{a=z_{it}}^{y_{it}} C^a_{y_{it}}(1-p_i)^{(y_{it}-a)}p_i^a, \quad (4)$$

and the probability to yield more than z_{it} item i in period t if $x_{1\ldots it}$ items are released is

$$p^{cy>}_{it}(z_{it}|x_{1\ldots it}) = \sum_{y_{it}=0}^{x_{it}} p^{y>}_{it}(z_{it}|y_{it}) \times p^{c=}_{it}(y_{it}|x_{1\ldots it}) \quad (5)$$

Finally,

$$p^{cy=}_{it}(z_{it}|x_{1\ldots it}) = \sum_{y_{it}=0}^{x_{it}} p^{y=}_{it}(z_{it}|y_{it}) \times p^{c=}_{it}(y_{it}|x_{1\ldots it}) \quad (6)$$

4.2 Capacity uncertainty

The processing of items i starts only once the first $i-1$ lots are completed. More precisely, y_{it} items i are processed in period t if the repairing time R_t respects the capacity constraint

$$\sum_{j=1}^{j=i-1} k_j x_{jt} + y_{it}k_i + R_t \leq C \quad (7)$$

where k_i is the capacity consumption per unit of item i, and C is the capacity per period.

For the sake of clarity, we define:

$$K = K(x_{1\ldots i-1t}, y_{it})) = \sum_{j\in 1\ldots i-1} k_j x_{jt} + k_i y_{it} \quad (8)$$

and

$$\bar{K} = \bar{K}(x_{1\ldots i-1t}, y_{it}) = C - K(x_{1\ldots i-1t}, y_{it})) \quad (9)$$

The probability $p^{c>}_{it}(y_{it}|x_{1\ldots it})$ to process more than y_{it} items i in periods t coincides with the probability $p^r(R_t < \bar{K}|K)$ to have less than $\bar{K}$ units of repair time in period t if the required processing time is K. That is,

$$p^{c>}_{it}(y_{it}|x_{1\ldots it}) = p^r(R_t < \bar{K})|K) \quad (10)$$

If the time to failure and repair time follow an exponential distribution, (Dolgui et al. 2005) showed that such a repair time probability can be computed as follows:

$$p^r(R_t \leq \bar{K}|K) = 1 - e^{-(KU+\bar{K}\bar{U})} \sum_{\nu=1}^{\infty}[\frac{(KU)^\nu}{\nu!} \sum_{j=0}^{\nu-1} \frac{(\bar{K}\bar{U})^j}{j!}] \quad (11)$$

where $\frac{1}{U}$ is the mean time between failures, and $\frac{1}{\bar{U}}$ is the mean time to repair. As mentioned in (Dolgui 2002), the infinite sum in (9) can be approximated with a large enough number, since the function converge quickly.

Finally, the probability $p_{it}^{c=}(y_{it}|x_{1\ldots it})$ to process precisely y_{it} items i in period t. can be inferred from $p_{it}^{c>}(y_{it}|x_{1\ldots it})$ as follows:

$$\begin{aligned} p_{it}^{c=}(y_{it}|x_{1\ldots it}) =& p_{it}^{c>}(y_{it}|x_{1\ldots it}) \\ & - p_{it}^{c>}(y_{it}+1|x_{1\ldots it}) \end{aligned} \tag{12}$$

In the case of $y_{it} = x_{it}$, if $p_{it}^{c>}(y_{it}|x_{1\ldots it})$ would be equal to 1, we set $p_{it}^{c=}(y_{it}|x_{1\ldots it})$ for $y_{it} = x_{it}$ equal to 1 and for all $y_{it} \leq x_{it}$ the value of the probability will ignore and consider it as 0.

4.3 Backlog and inventory uncertainty

The backlog/inventory level in period t can be computed from the backlog/inventory level in period $t-1$. More precisely, the flow conservation constraint can be expressed as follows

$$\widetilde{D}_{it} = \widetilde{D}_{it-1} - z_{it-1} + D_{it} \tag{13}$$

Equation (14) gives a recursive formula to compute the actual requirements (including backlog/inventory) in period t, where s_1 refers to the production in period $t-1$, and s_2 refers to the actual requirements in period $t-1$.

$$p_{it}^{b}(\widetilde{D}_{it}|x_{1\ldots i1\ldots t-1}) = \sum_{s_1,s_2|s_2-s_1+D_{it}=\widetilde{D}_{it}} p_{it-1}^{cy=}(s_1|x_{1\ldots it-1}) p_{it-1}^{b}(s_2|x_{1\ldots i1\ldots t-2}) \tag{14}$$

For the first period equation (14) must be replaced by equations (15) and (16).

$$p_{i1}^{b}(\widetilde{D}_{i1} = D_{i1}|\emptyset) = 1 \tag{15}$$

$$p_{i1}^{b}(\widetilde{D}_{i1} \neq D_{i1}|\emptyset) = 0 \tag{16}$$

The computation can be simplified as follows.

$$p_{it}^{b}(\widetilde{D}_{it}|x_{1\ldots i1\ldots t-1}) = \sum_{s_1=0}^{s_1=x_{it-1}} p_{it-1}^{cy=}(s_1|x_{1\ldots it-1}) p_{it-1}^{b}(\widetilde{D}_{it} - D_{it} + s_1|x_{1\ldots i1\ldots t-2}) \tag{17}$$

5 SOLUTION METHODS

In this talk, we will present a dynamic programming approach to compute the released quantities. In each stage, the algorithm computes the cost $H_i(V_{1\ldots T}^{i})$ of the optimal released quantities to complete the first i lots before the vector of times $V_{1\ldots T}^{i}$ in each period. Besides, we provide a speed-up strategy that eliminates dominated states. Indeed, the number of states in the proposed dynamic program grows exponentially with the number of periods. To circumvent this issue, we propose to prune the states based on a lower bound and dominance properties.

To validate the model and the proposed optimization approach, we will provide a numerical example and a comparison between the solution of the multi-period model against the solution obtained with the single-period model proposed in Dolgui et al. 2005 applied in each period independently. The results show that the solution of the multi-period model outperforms the single-period setting.

References

Agnihothri, S., J. S. Lee, and J. Kim (2000). "Lot sizing with random yields and tardiness costs". In: *Computers & Operations Research* 27.5, pp. 437–459.

Aloulou, M. A., A. Dolgui, and M. Y. Kovalyov (2014). "A bibliography of non-deterministic lot-sizing models". In: *International Journal of Production Research* 52.8, pp. 2293–2310.

Chakraborty, T., B. Giri, and K. Chaudhuri (2009). "Production lot sizing with process deterioration and machine breakdown under inspection schedule". In: *Omega* 37.2, pp. 257–271.

Chiu, S. W. (2010). "Robust planning in optimization for production system subject to random machine breakdown and failure in rework". In: *Computers & Operations Research* 37.5, pp. 899–908.

Ciarallo, F. W., R. Akella, and T. E. Morton (1994). "A periodic review, production planning model with uncertain capacity and uncertain demandâoptimality of extended myopic policies". In: *Management Science* 40.3, pp. 320–332.

Dolgui, A. (2002). "Performance analysis model for systems described by renewal process". In: *Engineering Simulation (Electronic Modeling)* 24.2, pp. 3–11.

Dolgui, A., G. Levin, and M.-A. Louly (2005). "Decomposition approach for a problem of lot-sizing and sequencing under uncertainties". In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 18.5, pp. 376–385.

Dolgui, A. and C. Prodhon (2007). "Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art". In: *Annual Reviews in Control* 31.2, pp. 269–279.

Dolgui, A. and J.-M. Proth (2010). *Supply chain engineering: useful methods and techniques*. Springer Science & Business Media.

Geng, N. and Z. Jiang (2007). "Capacity planning for semiconductor wafer fabrication with uncertain demand and capacity". In: *2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. IEEE, pp. 100–105.

Gerchak, Y. and A. Grosfeld-Nir (1998). "Multiple lot-sizing, and value of probabilistic information,

in production to order of an uncertain size". In: *International Journal of Production Economics* 56, pp. 191–197.

Gerchak, Y., Y. Wang, and C. A. Yano (1994). "Lot sizing in assembly systems with random component yields". In: *IIE transactions* 26.2, pp. 19–24.

Giri, B. and T. Dohi (2004). "Optimal lot sizing for an unreliable production system based on net present value approach". In: *International Journal of Production Economics* 92.2, pp. 157–167.

Giri, B. and W. Yun (2005). "Optimal lot sizing for an unreliable production system under partial backlogging and at most two failures in a production cycle". In: *International Journal of Production Economics* 95.2, pp. 229–243.

Güllü, R., E. Önol, and N. Erkip (1999). "Analysis of an inventory system under supply uncertainty". In: *International Journal of Production Economics* 59.1-3, pp. 377–385.

Haji, R., A. Haji, M. Sajadifar, and S. Zolfaghari (2008). "Lot sizing with non-zero setup times for rework". In: *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 17.2, p. 230.

Inderfurth, K. (2009). "How to protect against demand and yield risks in MRP systems". In: *International Journal of Production Economics* 121.2, pp. 474–481.

Jain, K. and E. A. Silver (1995). "The single period procurement problem where dedicated supplier capacity can be reserved". In: *Naval Research Logistics (NRL)* 42.6, pp. 915–934.

Karlin, S., H. Scarf, and K. J. Arrow (1958). *Studies in the mathematical theory of inventory and production*. Stanford University Press.

Khan, M., M. Jaber, and M. Wahab (2010). "Economic order quantity model for items with imperfect quality with learning in inspection". In: *International journal of production economics* 124.1, pp. 87–96.

Li, Q., H. Xu, and S. Zheng (2008). "Periodic-review inventory systems with random yield and demand: Bounds and heuristics". In: *IIE Transactions* 40.4, pp. 434–444.

Lin, G. C. and D.-C. Gong (2006). "On a production-inventory system of deteriorating items subject to random machine breakdowns with a fixed repair time". In: *Mathematical and Computer Modelling* 43.7-8, pp. 920–932.

Maddah, B. and M. Y. Jaber (2008). "Economic order quantity for items with imperfect quality: revisited". In: *International Journal of Production Economics* 112.2, pp. 808–815.

Moon, I., B.-H. Ha, and J. Kim (2012). "Inventory systems with variable capacity". In: *European Journal of Industrial Engineering* 6.1, pp. 68–86.

Papachristos, S. and I. Konstantaras (2006). "Economic ordering quantity models for items with imperfect quality". In: *International Journal of Production Economics* 100.1, pp. 148–154.

Salameh, M. and M. Jaber (2000). "Economic production quantity model for items with imperfect quality". In: *International journal of production economics* 64.1-3, pp. 59–64.

Schemeleva, K., X. Delorme, and A. Dolgui (2018). "Evaluation of solution approaches for a stochastic lot-sizing and sequencing problem". In: *International Journal of Production Economics* 199, pp. 179–192.

Schemeleva, K., X. Delorme, A. Dolgui, and F. Grimaud (2012). "Multi-product sequencing and lot-sizing under uncertainties: A memetic algorithm". In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25.8, pp. 1598–1610.

Silver, E. (1976). "Establishing the order quantity when the amount received is uncertain". In: *INFOR: Information Systems and Operational Research* 14.1, pp. 32–39.

Singh, M., C. Abraham, and R. Akella (1988). "Planning for production of a set of components when yield is random". In: *Fifth IEEE/CHMT International Electronic Manufacturing Technology Symposium, 1988,'Design-to-Manufacturing Transfer Cycle*. IEEE, pp. 196–200.

Teunter, R. H. and S. D. P. Flapper (2003). "Lot-sizing for a single-stage single-product production system with rework of perishable production defectives". In: *Or Spectrum* 25.1, pp. 85–96.

Wang, Y. and Y. Gerchak (1996a). "Continuous review inventory control when capacity is variable". In: *International Journal of Production Economics* 45.1-3, pp. 381–388.

— (1996b). "Periodic review production models with variable capacity, random yield, and uncertain demand". In: *Management science* 42.1, pp. 130–137.

— (2000). "Input control in a batch production system with lead times, due dates and random yields". In: *European Journal of Operational Research* 126.2, pp. 371–385.

Yano, C. A. and H. L. Lee (1995). "Lot sizing with random yields: A review". In: *Operations Research* 43.2, pp. 311–334.

Predictive maintenance based on decentralized CPS and Convolution's Neural Network

DAFFLON Baudouin
Universite Claude Bernard Lyon 1
DISP Laboratory
Bron, France
Baudouin.Dafflon@univ-lyon1.fr

BENTAHA Mohand-Lounes
Universite Lumiere Lyon 2
DISP Laboratory
Bron, France
Mohand.Bentaha@univ-lyon2.fr

MOALLA Nejib
Universite Lumiere Lyon 2
DISP Laboratory
Bron, France
Nejib.Moalla@univ-lyon2.fr

BENBOURICHE Alexandre
UP INDUSTRY
TARDY SAS
La Grand-Croix, France
A.Benbouriche@up-industry.fr

***Abstract*—The massive ingest of non-intrusive sensors on manufacturing processes lifecycle allows to collect and monitor the health state of machines and serve maintenance programmes. In this research paper, we use machines' monitoring data in a decentralised Cyber Physical System (CPS) architecture implementing Convolution's Neural Network algorithms to influence the future behaviour of manufacturing equipment in a predictive maintenance perspective. This research contributes to extend the remaining useful life (RUL) of equipment and was implemented in an industrial use case supported by TARDY partner for the predictive maintenance of metal transformation machines.**

***Index Terms*—CPS, AI, Predictive Maintenance, Industry 4.0**

I. Introduction

The emergence of the industry 4.0 paradigms and their related architectural frameworks (i.e. RAMI 4.0) in the last decade brings the concept of Cyber Physical System (CPS) as a promising contribution to the improvement of the reactivity of industrial processes. Process monitoring, product quality control, manufacturing processes optimisation, etc. emerge as some concreate applications of these concepts. Computerized Maintenance Management covers the concepts of preventive, predictive and proactive maintenance paradigms, and their related processes. Predictive Maintenance uses advanced technology to detect when failures will occur and harvests sensors for metrics assessment, monitoring services for fault detection, failure diagnostics or fault prognostics. In this research paper, we propose the concepts of decentralized Cyber Physical Systems as an approach to address the predictive maintenance problem. The CPS architecture covers data collection from sensors, predictive decision-making processes, and actuation mechanisms to influence the behaviour of manufacturing machines and then their maintenance programs. Convolution's Neural Network algorithms emerges as effective models to support the targeted decentralized decision-making process.
The proposed paper is organised in four sections covering after the introduction: a related work analysis of existing initiatives coupling CPS and predictive maintenance; the presentation of the CPS architecture, the building of the decision process, and finally a short presentation of an industrial use case supported by our industrial partner TARDY on the predictive maintenance of metal transformation machines.

II. Relative works

Equipment maintenance in production systems is a significant resource consuming task (money, time, labor, etc.) [1], [2]. A trivial maintenance policy is to fix machine failure when it occurs (corrective maintenance). This option can generate excessively high costs, because of unexpected breakdowns, especially for modern factories or heavy machinery [3], [4]. To prevent such breakdowns, policies like planning maintenance operations periodically based on machine operation time or usage can be used. This is known as preventive maintenance. This approach is more appropriate than corrective one. However, it represents two main drawbacks. The first one is that it can be costly to maintain particularly if maintenance intervals are closer. The second one is the fact that there is no knowledge capitalization about the machine degradation mode for future improvements [4], [5]. This later is exactly the aim of predictive maintenance, the actual evolution of maintenance. In fact, it allows to monitor machinery status in order to help on when to take decisions on maintenance options (repair, replace, etc.) based on machine degradation stage. Predictive maintenance comes with several advantages amongst which product quality improvement, cost reduction and increased flexibility [1]. The actual emerging technologies (CPS, IoT, Big Data, AI, etc.) have boosted its applicability in modern factories (Industry 4.0) [6]. Note that Prognostics and Health Management (PHM) defines a set of methods and techniques that can be used as maintenance inputs. Indeed, PHM assesses a machinery health and predicts its reliability and remaining useful life (RUL) to build a lifecycle management system [7], [8]. Hence, PHM should not be seen as a type of maintenance [9].

In the literature, several studies which seek to build formal models of predictive maintenance systems exist already [10]: MEP components [11], rail transportation and wind energy [12], Milling activity [13], Production Logistics in Aeronautics [14], integration into enterprise framework [15], SIMAP example [16], online performance assessment [17], OSA-CBM architecture [18]. Different case studies exist as well: drag system [19], CNC machine [20], railcar wheel bearing [21], vessel machinery [22], automotive brake pad [23], Comau industrial robots [24], locomotive example [25], Machine Tool Linear Axes [26], offshore wind turbine [27], cutting machine [28], DC motor [29], Turbomachinery [30], etc. See [31]–[34] for more practical examples.

To achieve predictive maintenance, several methods and techniques are used. They come from the domain of Artificial Intelligence (AI) or Machine Learning (ML) [4], [35]–[38]. They are data-driven and capable to build models exploitable for prediction and numerous other applications [2], [39], [40]. We can cite techniques as Neural Networks, Decision Trees, Support Vector Machines, etc. [13], [41]–[45]. Each method or model is selected based on various parameters : application environment, industrial process requirements, type of handled data, decisions to be made, solutions to be provided, etc.

In this work, we present a predictive maintenance framework based on Convolution's Neural Networks, [46]–[49], using decentralized CPSs. Such an approach transforms data from sensors into information to elaborate a machinery degradation knowledge and predict its future behavior targeting predictive maintenance, equipment lifetime extension and quality control applications. Advantages of the proposed strategy among other ones are safety, robustness and self-maintenance. The originality of this paper is given in detail in section III. This work is conducted within the TARDY company on the predictive maintenance of metal transformation machines. This is the first work addressing predictive maintenance of metal transformation machines using Convolution's Neural Networks algorithms and decentralized CPSs.

III. CPS Architecture

A. CPS Overview

[50] defines Cyber-Physical Systems (CPS) as an integration of computation with physical processes where embedded computers and networks monitor and control the physical processes. Feedback loops are usually used enabling physical processes to affect computations and vice versa. CPSs present an important intellectual challenge, CPS is relative to the intersection, not the union, of the physical and the cyber.

[51] consider that CPSs are in intensive interaction with the embedding techno-socio-economic environment as well as the human component. As illustrated in figure 1, [52] assume that the technologies used in the realization of CPS can be seen as physical technologies or cyber technologies: Cyber processing module is responsible for computation, communication and control.

Physics processing module is responsible for changing material and energy flows, as regulated by the laws of nature.

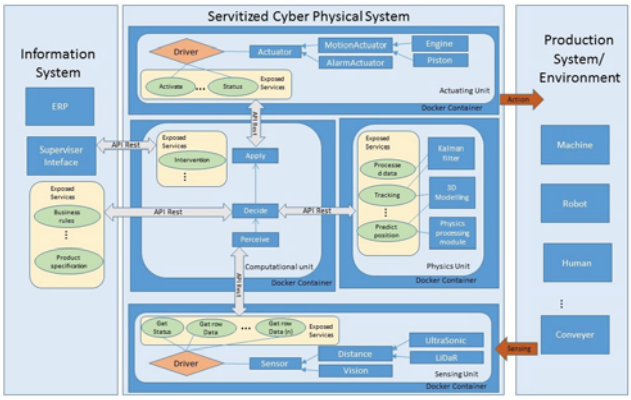


Fig. 1. Decomposition of CPS.

CPSs are considered as a valuable solution to control and monitor production systems. Hence, the emergence of the concept of Cyber-Physical Production systems. [53] defines it as a system that relies on advances in computer science, information and communication technologies, manufacturing science and technologies with the aim to lead to the 4th Industrial Revolution. A Cyber-Physical Production System, as presented by [54], brings to the production system a high predictability that involves characteristics such as robustness, self-maintenance and safety.

As explained previously, integrating CPS into manufacturing production systems brings significant advantages: CPSs are able to perceive the cyber as well as the physical environments of the production system. The observations made are taken into consideration and integrated into computations with feedback loops through cyber modelling of the real environment. The system's failures prediction, anticipation and robustness may be guaranteed in this way. Nevertheless, deploying a CPS while being isolated from other technologies is far from being sufficient to build an efficient manufacturing system that can be in line with the modern vision. The real added value brought by CPS into factories can only be noticed when implementing a CPS network. In order to manage those different entities while ensuring their autonomy, self-* behaviour, distributed thinking and scalable architecture, multi-agents paradigm may present a successful alternative. Gathered data and achieved results of CPS should be shared with other authenticated heterogeneous entities. To ensure this functionality, servitization offers the possibility to easily expose services and share information between different parts. Finally, to guarantee both vertical and horizontal communication between the different involved entities, facilitate data gathering from sensors and the communication issues, the use of IoT as an infrastructure for CPS presents a solution.

B. Architecture

The proposal consists of designing a servitized CPS Agent-based framework, that takes advantages of the technological

enablers mentioned in the previous section such as CPS, MAS, IoT and IoS. The idea is to implement a network of CPSs agent-based in an industrial context to supervise and control the production system. Each node of the network exposes services to other nodes and/or the information system.

The proposal is about implementing a CPSs network in a factory. These entities are in charge of supervising and controlling critical resources of the manufacturing system. Services supporting decision making are also provided by the present solution.
Multi-agents system paradigm has been adopted to support the interaction between the different deployed CPSs. These entities can be clustered depending on the nature of the tasks they perform. For example, a CPS can be in charge of scheduling the production operations, control the products quality, predict incident, etc.
As depicted in figure 1, the CPSs are able to communicate with each other (intra or inter-factory such in the case of collaboration) and also with both the information and the production system :

1) From the information system to CPSs: Information is transmitted through an ESB (Enterprise Service Bus) which is an effective way to provide interactions between services and applications. ESB can be deployed in a context of a service-oriented architecture. The ESB's main responsibilities are as follows (1) Reconcile heterogeneous environments: This is ensured by Interoperability standards or specialized connectors.(2) Decouple consumers and service providers(3) Aggregate services.(4) Process monitoring.
2) From the CPSs to the external environment (i.e. information system, other CPSs): information is transmitted through exposed services. For instance: CPS exposes a service that enables information system to have a real-time visibility on the state of the production system.
3) From production system to CPS (and vice-versa): the interaction between CPSs and workstation is performed by the use of sensors and actuators. This interaction is detailed in the next section through the proposed framework.

The originality of this proposition remains in inserting an intelligent layer between the workstation and the information system. This layer brings a higher flexibility and robustness by offering synergy, interaction and coordination with the company's resources. Functionalities such as real time monitoring, decision making support, last-minute self-reconfiguring and new context self-adapting may be achieved within this proposal.

1) Sensing unit: This unit deals with the acquisition of data from the sensors. It is composed of (1) "Driver repository" which consists on a set of programs for recognizing and using sensors (2) exhibition of a "Service Catalogue" that interfaces with drivers to query all available sensors. These services are exposed via REST API and invoked later by the "Computational unit".

2) Computational and Physics units: The computational unit could be seen as the core of the CPS. It collects all the data captured by the sensing unit and perform computational operations on it in order to make a decision which will be sent to the actuating unit. Some of the operations could be made by the physics unit which helps the computational unit to analyse and prepare the data to make the right decision. For example: in order to process raw data received from the sensors, the computational unit invokes a service exposed by the physics unit that performs Kalman filter. This operation enables the data cleansing and dealing with missing and non-coherent information.

3) Actuating unit: This unit catches the decisions from the computational unit and, then, acts on the production system. Also, using a set of exposed services, we can monitor the actuators: check the status, activate the actuator, etc.

IV. Decision process

In this section, we describe Decision process in more detail.

A. Sensor's Data

As shown by following figure (Fig. 2), Sensor's data are produced by a sensor network. These sensors placed on the observation machine are attached to a manager. This manager has a REST API. Data is exchanged in json and formatted

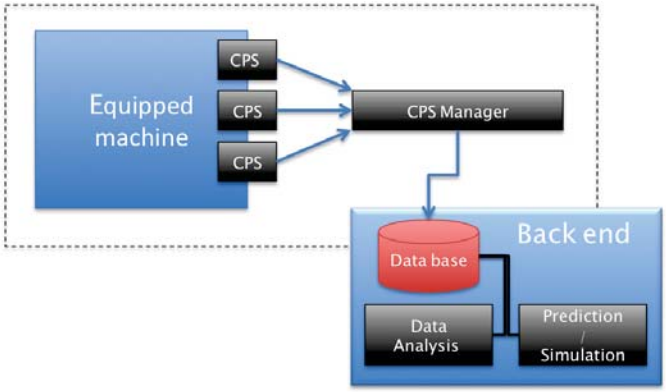


Fig. 2. Sensor data's

according to the international unit system. A first filtering steps is applied to limit measurement errors. Low-pass filter and Moving average were applied.

B. CNN Overview

A traditional convolutional network architecture is shown in Figure 3. In a fully-connected neuronal network, where each hidden activation is computed by multiplying all input V_i by weights W_j in the layer. However, in a CNNs, each hidden activation is computed by multiplying a local input against the weights W. The weights W are then shared across the entire input space. After computing the hidden units, a pooling layer helps to remove variability in the hidden units.

Specifically, each max-pooling unit receives activations from convolutional layer, and outputs the maximum. Most

CNN work in pattern recognition has the lower network layers be convolutional, while the higher network layers are fully connected.

1) DataSet: To build the data set, we will use the specifications of the observed machine and record the data provided by the sensors on the nominal operating ranges.

2) Architecture: The convolution network always have the same width as the time series, while their length can be varied. This way, the kernel moves in one direction from the beginning of a time series towards its end, performing convolution. It does not move to the left or to the right as it does when the usual 2-D convolution is applied to images. The elements of

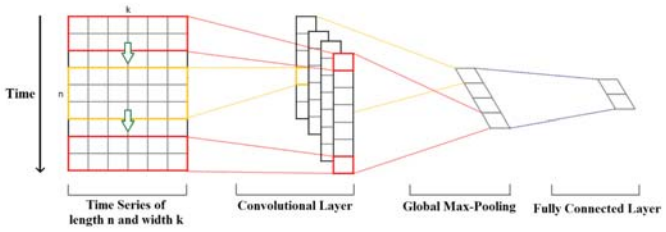


Fig. 3. 1-D Convolution for Time Series

the kernel get multiplied by the corresponding elements of the time series that they cover at a given point. Then the results of the multiplication are added together and a nonlinear activation function is applied to the value. The resulting value becomes an element of a new "filtered" uni-variate time series, and then the kernel moves forward along the time series to produce the next value. The number of new "filtered" time series is the same as the number of convolution kernels. Depending on the length of the kernel, different aspects, properties, "features" of the initial time series get captured in each of the new filtered series.

C. Decision

The decision expected by the system is an evaluation of the state of the machine. For this, the last layer of convolutional network is composed of neuron having a "softmax" activation function. Among the problems we want to classify, we can find:

- Continue service with no limitation (normal running)
- Modify operating conditions... (suspicious behavior)
- Repair specific components (impending fatigue or impending failure)
- Replace exhausted components (impending failure)
- Re-inspect at suitable time intervals (routine intervention)

V. USE CASE

The TARDY group develops innovative products using advanced production technologies (Industry 4.0, Metal 3D Printing, integrated diagnosis solutions, etc.). As one of the main TARDY's strategy pillars, TARDY evolves from part subcontractor to more active partner supporting the integration of valuable maintenance programs as a package of their products. During the exploitation of their solutions, TARDY supports the tuning of their products, their periodic maintenance and as much as possible the analysis of their working conditions. Face



Fig. 4. Casing Hoop Tool

to failure or low productivity situations (more time needed for QC), TARDY expert is faced to two possibilities:

- To diagnose the machine status and perform some restoration actions such as components replacement (eg pressure sensors)
- To reset the tuning of the machine and perform the calibration

These two steps are the most common ones to be undertaken for the most known problems. The operational maintenance of the machine is limited in time and in cost. However, after some exploitation years, several components (for fatigue reason) may affect the machine precision and the direct diagnosis becomes impossible. The two-step cycle should be done for each new component installed inside the machine. The consumed time affects the productivity and TARDY may be subject to penalties. Due to the imperfect knowledge of the equipment production conditions (external metal chips, pressure, temperature, presence of liquids, etc.), the analysis and the selection of one of the available intervention alterna-

tives (refurbishing, upgrading, repairing or re-tuning) is very time consuming and may be source of risk for the machine and the final product (carter). Figure 4 illustrates the role of the Casing Hoop Tools to support the quality controlling process inside the carter. By implementing the decentralised CPS architecture, TARDY aims at increasing the redundancy of physical sensors inside the Casing Hoop Tool by adding adapted sensors to measure the pressure, vibration, distance, usage and presence of unappropriated titanium ships on the carter. The analysis of these sensors' data helps to improve the operational reliability of the Casing Hoop Tool in the quality control process and the assessment of the Casing Hoop Tool lifetime.

VI. Conclusion

This paper presents an original predictive maintenance framework to support life time extension of TARDY metal transformation machines (Casing Hoop Tool), machining processes optimization and quality improvement applications. Developed framework integrates in an optimized manner servitized decentralized CPS agent based to achieve distributed thinking, self behavior, scalable architecture, build machinery degradation knowledge, etc. and uses convolutional neural network algorithms to support the decision-making process for predictive maintenance purposes. All is implemented on an industrial use case propped by TARDY company for the predictive maintenance of its metal transformation machines.

The next step is the setup and deployment of proposed system in TARDY company which will include a Casing Hoop Tool. Such a machine will be monitored. For industrial validation of the framework, several analyses will be performed on different periods of time. Efficiency of developed convolutional neural network training when a new component is added should be handled.

References

[1] B. Nikolic, J. Ignjatić, N. Suzic, B. Stevanov, and A. Rikalovic, "Predictive manufacturing systems in industry 4.0: Trends, benefits and challenges," 2017.

[2] N. Amruthnath and T. Gupta, "A research study on unsupervised machine learning algorithms for early fault detection in predictive maintenance," in *5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 2018, pp. 355–361.

[3] J. Lee, E. Lapira, S. Yang, and A. Kao, "Predictive manufacturing system - trends of next-generation production systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 7, pp. 150 – 156, 2013, 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems.

[4] J.-R. Ruiz-Sarmiento, J. Monroy, F.-A. Moreno, C. Galindo, J.-M. Bonelo, and J. Gonzalez-Jimenez, "A predictive model for the maintenance of industrial machinery in the context of industry 4.0," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 87, p. 103289, 2020.

[5] J. Lee, E. Lapira, S. Yang, and A. Kao, "Predictive manufacturing system - trends of next-generation production systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 7, pp. 150 – 156, 2013, 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems.

[6] J. Lee, H.-A. Kao, and S. Yang, "Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment," *Procedia CIRP*, vol. 16, pp. 3 – 8, 2014, product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems.

[7] R. Gouriveau, K. Medjaher, and N. Zerhouni, *From Prognostics and Health Systems Management to Predictive Maintenance 1: Monitoring and Prognostics*. John Wiley & Sons, 2016.

[8] J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao, and D. Siegel, "Prognostics and health management design for rotary machinery systems-reviews, methodology and applications," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 42, no. 1, pp. 314 – 334, 2014.

[9] A. C. Márquez, V. G.-P. Díaz, and J. F. G. Fernández, Eds., *Advanced Maintenance Modelling for Asset Management*. Springer International Publishing, 2018.

[10] A. Werner, N. Zimmermann, and J. Lentes, "Approach for a holistic predictive maintenance strategy by incorporating a digital twin," *Procedia Manufacturing*, vol. 39, pp. 1743 – 1751, 2019, 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing August 9-14, 2019 — Chicago, Illinois (USA).

[11] J. C. Cheng, W. Chen, K. Chen, and Q. Wang, "Data-driven predictive maintenance planning framework for mep components based on bim and iot using machine learning algorithms," *Automation in Construction*, vol. 112, p. 103087, 2020.

[12] R. Sahal, J. G. Breslin, and M. I. Ali, "Big data and stream processing platforms for industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 54, pp. 138 – 151, 2020.

[13] E. Traini, G. Bruno, G. D'Antonio, and F. Lombardi, "Machine learning framework for predictive maintenance in milling," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 177 – 182, 2019, 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019.

[14] K. Hribernik, M. von Stietencron, A. Bousdekis, B. Bredehorst, G. Mentzas, and K.-D. Thoben, "Towards a unified predictive maintenance system - a use case in production logistics in aeronautics," *Procedia Manufacturing*, vol. 16, pp. 131 – 138, 2018, proceedings of the 7th International Conference on Through-life Engineering Services.

[15] M. F. P. G. Milan Gregor, Michal Haluška, "Model of intelligent maintenance systems," in *26th DAAAM Internacional Symposium on Intelligent Manufacturingand Automation*, 2016, pp. 1097–1101.

[16] M. C. Garcia, M. A. Sanz-Bobi, and J. [del Pico], "Simap: Intelligent system for predictive maintenance: Application to the health condition monitoring of a windturbine gearbox," *Computers in Industry*, vol. 57, no. 6, pp. 552 – 568, 2006, e-maintenance Special Issue.

[17] D. Djurdjanovic, J. Lee, and J. Ni, "Watchdog agent-an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 17, no. 3, pp. 109 – 125, 2003, intelligent Maintenance Systems.

[18] M. Lebold and K. Reichard, "Osa-cbm architecture development with emphasis on xml implementations," 2002.

[19] A. R. Sahu and S. K. Palei, "Fault prediction of drag system using artificial neural network for prevention of dragline failure," *Engineering Failure Analysis*, vol. 113, p. 104542, 2020.

[20] W. Luo, T. Hu, Y. Ye, C. Zhang, and Y. Wei, "A hybrid predictive maintenance approach for cnc machine tool driven by digital twin," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 65, p. 101974, 2020.

[21] I. Daniyan, K. Mpofu, M. Oyesola, B. Ramatsetse, and A. Adeodu, "Artificial intelligence for predictive maintenance in the railcar learning factories," *Procedia Manufacturing*, vol. 45, pp. 13 – 18, 2020, learning Factories across the value chain – from innovation to service – The 10th Conference on Learning Factories 2020.

[22] V. J. Jimenez, N. Bouhmala, and A. H. Gausdal, "Developing a predictive maintenance model for vessel machinery," *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2020.

[23] P. Rajesh, N. Manikandan, C. Ramshankar, T. Vishwanathan, and C. Sathishkumar, "Digital twin of an automotive brake pad for predictive maintenance," *Procedia Computer Science*, vol. 165, pp. 18 – 24, 2019, 2nd International Conference on Recent Trends in Advanced Computing ICRTAC -DISRUP - TIV INNOVATION , 2019 November 11-12, 2019.

[24] R. Pinto and T. Cerquitelli, "Robot fault detection and remaining life estimation for predictive maintenance," *Procedia Computer Science*, vol. 151, pp. 709 – 716, 2019.

[25] O. Altıntaş, M. Aksoy, E. Ünal, O. Akgöl, and M. Karaaslan, "Artificial neural network approach for locomotive maintenance by monitoring dielectric properties of engine lubricant," *Measurement*, vol. 145, pp. 678 – 686, 2019.

[26] B. Schmidt and L. Wang, "Predictive maintenance of machine tool linear axes: A case from manufacturing industry," *Procedia Manufacturing*, vol. 17, pp. 118 – 125, 2018, 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14,

2018, Columbus, OH, USAGlobal Integration of Intelligent Manufacturing and Smart Industry for Good of Humanity.

[27] Y. Lu, L. Sun, X. Zhang, F. Feng, J. Kang, and G. Fu, "Condition based maintenance optimization for offshore wind turbine considering opportunities based on neural network approach," *Applied Ocean Research*, vol. 74, pp. 69 – 79, 2018.

[28] J. Lee, E. Lapira, S. Yang, and A. Kao, "Predictive manufacturing system - trends of next-generation production systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 7, pp. 150 – 156, 2013, 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems.

[29] S. Yang, "An experiment of state estimation for predictive maintenance using kalman filter on a dc motor," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 75, no. 1, pp. 103 – 111, 2002.

[30] T. A. P. Lopes and A. C. R. Troyman, "Neural networks on predictive maintenance of turbomachinery," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 30, no. 18, pp. 983 – 988, 1997, iFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS 97), Kingston upon Hull, UK, 26-28 August 1997.

[31] Z. Li, K. Wang, and Y. He, "Industry 4.0 - potentials for predictive maintenance," in *International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*, 2016, pp. 42–46.

[32] K. li Wang, "Intelligent predictive maintenance (ipdm) system – industry 4.0 scenario," *WIT transactions on engineering sciences*, vol. 113, pp. 259–268, 2016.

[33] J.-H. Shin and H.-B. Jun, "On condition based maintenance policy," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 119 – 127, 2015.

[34] P. Ashok, B. James, and G. Subramaniam, "Condition based maintenance: a survey," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 18, no. 4, p. 384–400, 2012.

[35] M. Xia, X. Zheng, M. Imran, and M. Shoaib, "Data-driven prognosis method using hybrid deep recurrent neural network," *Applied Soft Computing*, vol. 93, p. 106351, 2020.

[36] I. Lazakis, Y. Raptodimos, and T. Varelas, "Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks," *Ocean Engineering*, vol. 152, pp. 404 – 415, 2018.

[37] Gomez, D. C. de la Fuente, García, Rosillo, and Puche, "A vision of industry 4 . 0 from an artificial intelligence point of view," 2016.

[38] A. Lucifredi, C. Mazzieri, and M. Rossi, "Application of multiregressive linear models, dynamic kriging models and neural network models to predictive maintenance of hydroelectric power systems," 2000.

[39] D. Wu, C. Jennings, J. Terpenny, R. X. Gao, and S. Kumara, "A Comparative Study on Machine Learning Algorithms for Smart Manufacturing: Tool Wear Prediction Using Random Forests," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 139, no. 7, 04 2017, 071018.

[40] T. Wuest, D. Weimer, C. Irgens, and K.-D. Thoben, "Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications," *Production & Manufacturing Research*, vol. 4, no. 1, pp. 23–45, 2016.

[41] A. Zaranezhad, H. A. Mahabadi], and M. R. Dehghani, "Development of prediction models for repair and maintenance-related accidents at oil refineries using artificial neural network, fuzzy system, genetic algorithm, and ant colony optimization algorithm," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 131, pp. 331 – 348, 2019.

[42] A. Bousdekis, K. Lepenioti, D. Apostolou, and G. Mentzas, "Decision making in predictive maintenance: Literature review and research agenda for industry 4.0," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 607 – 612, 2019, 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019.

[43] T. P. Carvalho, F. A. A. M. N. Soares, R. Vita, R. da P. Francisco, J. P. Basto, and S. G. S. Alcalá, "A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 137, p. 106024, 2019.

[44] W. J. Lee, H. Wu, H. Yun, H. Kim, M. B. Jun, and J. W. Sutherland, "Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data," *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 506 – 511, 2019, 26th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE) Purdue University, West Lafayette, IN, USA May 7-9, 2019.

[45] E. Uhlmann, A. Laghmouchi, C. Geisert, and E. Hohwieler, "Decentralized data analytics for maintenance in industrie 4.0," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 1120 – 1126, 2017, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy.

[46] B. Wang, Y. Lei, T. Yan, N. Li, and L. Guo, "Recurrent convolutional neural network: A new framework for remaining useful life prediction of machinery," *Neurocomputing*, vol. 379, pp. 117 – 129, 2020.

[47] A. Kumar, Y. Zhou, C. Gandhi, R. Kumar, and J. Xiang, "Bearing defect size assessment using wavelet transform based deep convolutional neural network (dcnn)," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 2, pp. 999 – 1012, 2020.

[48] L. Zou, Y. Li, and F. Xu, "An adversarial denoising convolutional neural network for fault diagnosis of rotating machinery under noisy environment and limited sample size case," *Neurocomputing*, vol. 407, pp. 105 – 120, 2020.

[49] Y. Liang, W. Li, X. Lu, and S. Wang, "Fog computing and convolutional neural network enabled prognosis for machining process optimization," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 52, pp. 32 – 42, 2019.

[50] E. A. Lee, "Computing foundations and practice for cyber-physical systems: A preliminary report," *University of California, Berkeley, Tech. Rep. UCB/EECS-2007-72*, 2007.

[51] P. Guturu and B. Bhargava, "Cyber-physical systems: a confluence of cutting edge technological streams," in *International conference on advances in computing and communication*, vol. 138, 2011.

[52] I. Horvath and B. H. Gerritsen, "Cyber-physical systems: Concepts, technologies and implementation principles," in *Proceedings of TMCE*, vol. 1, 2012, pp. 7–11.

[53] L. Monostori, "Cyber-physical production systems: Roots, expectations and r&d challenges," *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 9–13, 2014.

[54] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, and K. Ueda, "Cyber-physical systems in manufacturing," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 65, no. 2, pp. 621–641, 2016.

A MIXED INTEGER LINEAR PROGRAM FOR HUMAN AND MATERIAL RESOURCES OPTIMIZATION IN EMERGENCY DEPARTMENT

Ibtissem Chouba, Lionel Amodeo, Farouk Yalaoui, Taha Arbaoui
Institut Charles Delaunay (CNRS FRE 2019), LOSI
Université de Technologie de Troyes,
12 Rue Marie Curie, CS 42060 10004
Troyes cedex, France
ibtissem.chouba @utt.fr, lionel.amodeo@utt.fr,
farouk.yalaoui@utt.fr, taha.arbaoui@utt.fr

David Laplanche
Pôle Territorial Santé Publique et Performance ,
Centre Hospitalier de Troyes
101 Avenue Anatole France, 10000, Troyes, France
david.laplanche@ch-troyes.fr

ABSTRACT: *The discrepancy between patient demand and the emergency departments (ED) capacity, that mainly depends on human resources and on beds available for patients, often lead to ED's overcrowding and to the increase in waiting time. In this paper, we focus on the optimization of the human (medical and paramedical staff) and material resources (beds) in the ED of the hospital center of Troyes, France (CHT). We seek to minimize the total number of waiting patients from their arrival to their discharge. We propose a mixed integer linear program solved by a sample average approximation (SAA) approach. The program has been tested on a set of real data gathered from the ED information system. Numerical results show that the optimization of human and material resources leads to a decrease of total number of waiting patients.*

KEYWORDS: *Emergency department, resources optimization, mixed integer linear programming*.

1 INTRODUCTION

Over the last decades, ED overcrowding has known an important and serious growth around the world. This is due to several hospital's internal and external factors such as: high demand (patient overflow) for services, seasonal epidemics, long waiting time and limited resources. Thus, this phenomenon is known to have adverse impacts on the performance and quality of ED services. To overcome these problems, resources' optimization is an excellent approach by which an efficient system can be achieved [1].

In this context, human and material resource planning of the healthcare system is widely reported in the literature. Several works have introduced simulation, mathematical, linear programming or heuristics models for the desired optimization [1,2,3,4,5,6,7,8,9].

In 2009, Ahmed and Alkhamis [7] proposed a simulation-based optimization approach as a decision support system for the ED in a hospital in Kuwait. The authors aimed to find the optimal staff number that allows to minimize the patients' waiting time. The results provided a decrease of 40% in patients' waiting time. All the levels of the ED process were taken into account in this study. However, optimization model was limited to the staffing of the ED only as other resources were not considered.

In 2012 and 2015, Carbera [1] and Ghanes et al. [6] were interested to minimize the patient's inpatient stay using simulation models. Ghanes et al. [6] proposed a simulation-based optimization model to improve the ED of the French urban hospital Saint Camille taking into account the stochastic aspect of patient's arrival. The new configuration of the ED staff yields a choice of 10% increase in staffing budget resulting 33% reduction of the patient's length of stay (LOS). Also, Carbera [1] proposed an agent simulation approach coupled with an exhaustive search optimization to determine the optimal ED staff configuration (emergency physicians, nurses and administrative staff).

In 2017, Feng et al. [5] presented a new multi-objective simulation optimization algorithm that integrates non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA II) and multi-objective computing budget allocation (MOCBA) in order to determine the optimal medical resources allocation solution that minimize the patient's LOS and the total medical wasted cost.

El-Rifai et al. [2] proposed a stochastic mixed-integer linear program (MILP) solved by a sample average approximation (SAA) approach to allocate the physicians and nurses of the ED of the hospital center of Lille in France while taking into account the stochastic nature of patient's arrivals and service times. The authors aim to minimize the total expected patients' waiting time. Then, to evaluate the resulting personnel schedules, a discrete-event simulation model is used. In this work, only three queues are considered: two assessment queues (patients before and after having auxiliary examinations) operated

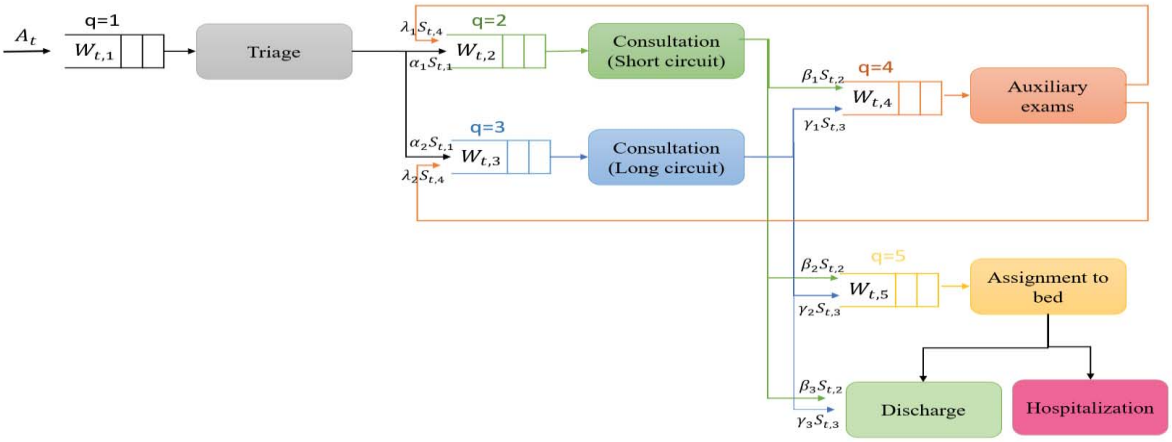


Figure 1 : Patient flow in ED service

by physicians and a third queue operated by nurses for treatment of patients.

In 2018, based on the method proposed by El-Rifai et al. [2], Daldoul et al. [3] used a stochastic MILP solved by SAA to optimize human (physicians and nurses) and also materials (beds) resources organization in the ED at the La-Rabta Tunisian public hospital. They aim to minimize the patient's waiting time, under the uncertainty of the number of patients' arrivals and their service time. In contrast to El-Rifai et al. [2], the authors consider the entire process of an ED from the triage of patient to bed assignment. In the two cases study [2,3], numerical results proved that the patient's waiting time can be decreased by optimizing the number of the human and material resources.

Through the literature review, we note that not all works consider all levels of the process or optimize all the medical and paramedical resources. Also, few studies have utilized the SAA approach to solve the stochastic problems in ED [2,3,8].

In this paper, we focus on the optimization of human (medical and paramedical) and material (beds) resources of the ED of the CHT, France. We aim to increase patients' satisfaction by reducing the number of waiting patients from the triage process to the discharge or the assignment to a bed in the ED. Our model captures all the complexity of the ED process that varies according the patient's state (more details in Section 2). In addition, the uncertainty related to patient's arrival and to the service time are taken into consideration. To achieve this, we develop a stochastic MILP solved by SAA which is one technique of Monte Carlo sampling methods [9]. The proposed model is an extension of the problem proposed by Daldoul et al. [3].

The main contributions of our approach compared to existing work, particularly that of Daldoul et al. [3], are twofold. First, we consider all medical and paramedical resource in the optimization model. Second, to our best knowledge, our work is the first to consider the patient's arrivals forecasts that are introduced as input data in the optimization model. The expected values of patients' arrivals are obtained through forecasting models developed in a previous work [20]. These models proved a very good performance (up to 91,24 % for the annual total flow forecast) and a robustness during epidemic periods [10]. Using these forecasting models, we adapt or relocate necessary resources to meet demand on the long or short term runs.

2 MODELLING

Each process in the ED can be modeled as a queue where jobs to be served are the patients and the hospital staff are the servers that handle these jobs [2]. Presented as a queuing system, Figure 1 illustrates the patient's process in the ED of CHT. Two main circuits exist: the short circuit and the long circuit. Within the short circuit, they are mostly autonomous patients, who do not need major paramedical care. Thus, we consider five queues: the first queue (q=1) is for the triage process operated by a triage nurse; the second (q=2) and the third (q=3) queues are for medical consultation in short and long circuit respectively. These queues are operated by the medical (physician, internal) and paramedical (nurse, caregiver) staff. The fourth queue (q=4) is dedicated to auxiliary exams and is operated by nurses. The fifth queue (q=5) is devoted to patients waiting to be assigned to a bed in ED.

In the triage process ($S_{t,1}$), the nurse identifies the patient's state and the pathway they go through: either the short (α_1, $S_{t,1}$) or the long (α_2, $S_{t,1}$) circuit. Once an appropriate box becomes free, the physician makes a first assessment ($S_{t,2}$ or $S_{t,3}$ for the short and the long circuit respectively) and decides if the patient needs auxiliary exams to confirm or to refine their diagnosis ($\beta_1 S_{t,2}$ and $\gamma_1 S_{t,3}$), to be assigned to a bed ($\beta_2 S_{t,2}$and $\gamma_2 S_{t,3}$) or to be discharged to go home ($\beta_3 S_{t,2}$ and $\gamma_3 S_{t,3}$). In the case where tests are requested, a second assessment is required in the short or the long circuit ($\lambda_1 S_{t,4}$ and $\lambda_2 S_{t,4}$ respectively).

3 MATHEMATICAL FORMULATION

A mathematical formulation based on the details discussed previously is presented in this section. The objective is to increase the patient's satisfaction through the optimization of the number of human and material resources and the minimization of the number of waiting patients.

3.1 Parameters

T: Planning horizon
t: Different period of the day [1..T]
I: The number of different types of human resources
i: A type of human resource available [1..I]
Q: The total number of queues
q: The queue number [1..Q]
$N_{i,q}$: The total number of each human resource i, $\forall i \in [1..I], \forall q \in [1..Q], Q \neq 5$
Nb: The total number of beds
n: Number of resources of each type [1..Ni,q]
α_j: Coefficient associated with the patient flow served in the triage box, $\forall j \in [1..4]$
β_j: Coefficient associated with the patient flow served in the box of consultation in short circuit, $\forall j \in [1..4]$
γ_j: Coefficient associated with the patient flow served in the box of consultation in long circuit, $\forall j \in [1..2]$
λ_j: Coefficient associated with the patient flow served in the box of auxiliary exams, $\forall j \in [1..2]$
TT_i: The number of total working hours available to schedule resources of type i
LBD: Lower bound of the shift length
UBD: Upper bound of the shift length
At (ω): Random variable representing the number of patients arriving at each period t, under scenario ω.
$L_{i,n,t,q}$ (ω): Random variable representing the service capacity of the staff, i.e. the number of patients that n resources of type i can serve during period t for each queue q, under scenario ω.

3.2 Decision variables

$x_{i,n,t,q} = \begin{cases} 1, \text{ if there are exactly n resources of type i woking at period t.} \\ 0 \text{ else.} \end{cases}$

$p_{i,t,q}$: The number of resources of type i at period t, $\forall q \in [1..Q], Q \neq 5$

$s_{i,t,q}$: The number of resources of type i starting at period t, $\forall i \in [1..I], \forall q \in [1..Q], Q \neq 5$

$e_{i,t,q}$: The number of resources of type i ending at period t, $\forall i \in [1..I], \forall q \in [1..Q], Q \neq 5$

sb_t : The number of occupied beds at the start of period t

eb_t : The number of liberated beds at the start of period t

b_t : The number of beds at period t

$w_{t,q}$ (ω): The number of waiting patients in queue q at the start of period t, under scenario ω.

$S_{t,q}$ (ω): The number of patients served in a queue q during period t, under scenario ω.

3.3 Resource optimization stochastic model:

$$(P): \quad Min\ E_\omega \left[\sum_{t=1}^{T} \sum_{q=1}^{Q} (W_{t,q}(\omega) - S_{t,q}(\omega)) \right] \tag{1}$$

$$W_{1,1}(\omega) = A_{1,q}(\omega) \tag{2}$$

$$W_{1,q}(\omega) = 0 \qquad \forall\, q \in [2..Q] \tag{3}$$

$$S_{1,q}(\omega) = 0 \qquad \forall\, q \in [1..Q] \tag{4}$$

$$W_{t,1}(\omega) = W_{t-1,1}(\omega) + A_t(\omega) - S_{t-1,1}(\omega) \qquad \forall\, t \in [2..T] \tag{5}$$

$$W_{t,2}(\omega) = W_{t-1,2}(\omega) + \alpha_1 S_{t-1,1}(\omega) + \lambda_1 S_{t-1,1}(\omega) - S_{t-1,2}(\omega) \qquad \forall\, t \in [2..T] \tag{6}$$

$$W_{t,3}(\omega) = W_{t-1,3}(\omega) + \alpha_2 S_{t-1,1}(\omega) + \lambda_2 S_{t-1,1}(\omega) - S_{t-1,3}(\omega) \qquad \forall\, t \in [2..T] \tag{7}$$

$$W_{t,4}(\omega) = W_{t-1,4}(\omega) + \beta_1 S_{t-1,2}(\omega) + \gamma_1 S_{t-1,3}(\omega) - S_{t-1,4}(\omega) \qquad \forall\, t \in [2..T] \tag{8}$$

$$W_{t,5}(\omega) = W_{t-1,5}(\omega) + \beta_2 S_{t-1,2}(\omega) + \gamma_2 S_{t-1,3}(\omega) - S_{t-1,5}(\omega) \qquad \forall\, t \in [2..T] \tag{9}$$

$$S_{t,q}(\omega) \leq W_{t,q}(\omega) \qquad \forall\, t \in [1..T]\ \forall\, q \in [1..Q] \tag{10}$$

$$S_{t,1}(\omega) \leq \sum_{n=1}^{N_{1,1}} L_{i,n,t,1}(\omega) * x_{i,n,t,1} \qquad \forall\, t \in [1..T] \quad \forall\, i \in [1..I] \tag{11}$$

$$S_{t,2}(\omega) \leq \sum_{n=1}^{N_{i,2}} L_{i,n,t,2}(\omega) * x_{i,n,t,2} \qquad \forall\, t \in [1..T] \quad \forall\, i \in [1..I] \tag{12}$$

$$S_{t,3}(\omega) \leq \sum_{n=1}^{N_{i,3}} L_{i,n,t,3}(\omega) * x_{i,n,t,3} \qquad \forall\, t \in [1..T] \quad \forall\, i \in [1..I] \tag{13}$$

$$S_{t,4}(\omega) \leq \sum_{n=1}^{N_{3,4}} L_{3,n,t,4}(\omega) * x_{3,n,t,4} \qquad \forall\, t \in [1..T] \tag{14}$$

$$S_{t,5}(\omega) \leq b_t \qquad \forall\, t \in [1..T] \tag{15}$$

$$\sum_{t=1}^{T} p_{i,t,q} \leq TT_i \qquad \forall\, i \in [1..I]\ \forall\, q \in [1..Q]\ q \neq 5 \tag{16}$$

$$\sum_{t=1}^{T} (s_{i,t,q} - p_{i,t,q}) = 0 \qquad \forall\, i \in [1..I]\ \forall\, q \in [1..Q]\ q \neq 5 \tag{17}$$

$$p_{i,t,q} = \sum_{t'=2}^{t} (s_{i,t',q} - e_{i,t',q}) + p_{i,1,q} \qquad \forall\, t \in [2..T]\ \forall\, i \in [1..I]\ \forall\, q \in [1..Q]\ q \neq 5 \tag{18}$$

$$p_{i,1,q} = p_{i,t,q} + s_{i,1,q} - e_{i,1,q} \qquad \forall\, i \in [1..I]\ \forall\, q \in [1..Q]\ q \neq 5 \tag{19}$$

$$\sum_{t'=t+1}^{\text{mod (t+LBD, T+1)}} e_{i,t',q} \leq p_{i,t,q} - s_{i,1,q} \qquad \forall\, t \in [1..T]\ \forall\, i \in [1..I]\ \forall\, q \in [1..Q]\ q \neq 5 \tag{20}$$

$$\sum_{t'=t+1}^{\text{mod (t+UBD+1, T+1)}} e_{i,t',q} \leq p_{i,t,q} \qquad \forall\, t \in [1..T]\ \forall\, i \in [1..I]\ \forall\, q \in [1..Q]\ q \neq 5 \tag{21}$$

$$b_1 = Nb \tag{22}$$

$$eb_1 = NB \tag{23}$$

$$sb_1 = 0 \tag{24}$$

$$b_t = b_{t-1} + eb_t - sb_t \qquad \forall\, t \in [2..T] \tag{25}$$

$$\sum_{n=1}^{N_{i,q}} n * x_{i,n,t,q} = p_{i,t,q} \qquad \forall\, t \in [1..T]\ \forall\, i \in [1..I]\ \forall\, q \in [1..Q]\ q \neq 5 \tag{26}$$

$$\sum_{n=1}^{N_{i,q}} x_{i,n,t,q} = 1 \qquad \forall\, t \in [1..T]\ \forall\, i \in [1..I]\ \forall\, q \in [1..Q]\ q \neq 5 \tag{27}$$

$$p_{i,t,q} \geq 1 \qquad \forall\, t \in [1..T]\ \forall\, i \in [1..I] \tag{28}$$

$$p_{i,t,q} \geq s_{i,t,q} + 1 \qquad \forall\, t \in [1..T]\ \forall\, i \in [1..I] \tag{29}$$

The objective function (1) aim to minimize the expected value (E[.]) of the total number of waiting patients while respecting to the distribution of the random value of patient arrival and service times. ω designates one scenario of patient arrival and service time in the ED. Constraint (2), (3), and (4) initialize the number of patients in the queues in each scenario. Constraint (5) to (9) update the number of patients in each queue at every period. Constraint (10) specifies a logical bound for the number of patients served during a period, that cannot be larger than the number of patients in the queue. Constraints (11) through (15) limit the number of patients

served in each queue at every period. Constraint (16) limits the total number of staffing hours available for each type of resource. Constraints (17), (18), and (19) are logical constraints that define the range of values that the variables p, s, and e can take. Constraint (20) ensures that at least $s_{i,t,q}$ resources of type i will not end their shift from t to (t + LBD), for each queue q. Moreover, constraint (21) ensures that the last $p_{i,t,q}$ resources of type i end their shift from t + 1 to (t + UBD + 1). Constraints (22), (23), and (24) initialize the number of existing beds, liberated and occupied. Constraint (25) defines the number of available beds at every period. Equations (26) and (27) assign a value to the variable x, which is used to limit the number obtained in constraints (11) through (15). Finally, constraints (28) and (29) are operational constraints to ensure that there are different moments of the day where resources of type i start working and that there is at least one resource of each type in every period.

4 NUMERICAL RESULTS

In this section, we present the numerical results of the MILP solved by the SAA method. The main idea of the SAA method is to approximate the expected objective function of the stochastic problem by a sample average estimate derived from a random sample. The resulting sample average approximating problem is then solved by deterministic optimization techniques. The process is repeated with different samples to obtain candidate solutions along with statistical estimates of their optimality gaps [9].

To solve the model, we use the commercial solver IBM ILOG CPLEX 12.5. All the parameters, historical performances and input data are based on real data gathered from the ED's information system and covering the whole year 2019. Based on these data, we use the input analyzer of the ARENA software to generate the distributions of patient's arrivals and services' times in each queue for each period of the scheduling horizon. We assume that the scheduling time horizon is equal 6 hours and the time period (time step) is equal to 1 hour.

To evaluate the performance of the proposed approach, we varied K, the number of scenarios, to obtain K independent random samples of the patient's arrival ($A_t^1 \ldots A_t^k$) and the services' times ($L_t^1 \ldots L_t^k$). The different values of K are [5, 10, 20, 30, 40, 50]. For each of these values, we run the model with seven different replications to produce seven Monte Carlo optimum solutions. The expected total patient's waiting number stabilizes for approximately K = 30 scenarios. We notice that the bigger K is, the better the solution tends towards convergence.

Optimization results are presented in Table 1. We consider 30 scenarios and we present the results of the proposed configurations. First, Table 1 provides the performance (total number of waiting patients) of the current configuration of the ED system which corresponds to the average of the different real scenarios. Second, the performance of the reproduction model (Configuration 1), in which the same number of resources available in the ED are considered, is displayed to evaluate the robustness of our model. Third, the performance of the optimization model (Configuration 2) is shown. Using this model, we measure the impact of the optimizing the number of medical and paramedical resources on each queue *q*. In our experiments, we consider that the maximum number of both medical and paramedical staff per period is equal to 3 (Physician P1=3, Internal P2=3, Nurse P3=3, Caregiver P4=3), and that the number of beds is 17.

Table 1 shows that the total number of waiting patients associated with Configuration 1 (104 patients) is close the real total number of waiting patients (116 patients). For Configuration 2, our model improves the performance by 24% by decreasing the total waiting patients from 104 patients to 79 patients. Optimization results demonstrate that reducing the total number of waiting patients requires adding resources in certain periods and queues.

4.1 Incorporating forecasts of patients' arrival

In our work, instead of real arrivals, we introduce patients' arrivals forecasts (Afilal et al. [10]) of the ED of CHT as input data for each period in the optimization model. Following the analysis of patients' arrival data, we noticed that the arrival rate follows a typical behavior whatever the day of the week and the hour of the day. As a result, we can calculate the estimated number of patient arrivals per hour (estimated arrival value* percentage of arrivals per hour). For the resolution, the expected arrival value will be set K times for each period and we generate K independent random samples of the services time.

We test the model, with data of 29-November 2019 (Figure 2) where the mean absolute error between arrival forecasts and observation equal to zero and the number of patients' arrivals was 10% higher than the average daily arrival. This allow as to test the sensitivity and the robustness of the model during an epidemic period for example.

Obtained results are summarized in Table 2. We compute the total number of waiting patients number and the number of required physicians.

Results demonstrate that the total number of waiting patients increases with the increase in the number of patients. Thus, by comparing the optimal configurations, we observe that the number of physicians remains stable in long circuit, except in the first two. However, for the short circuit, we have to add two physicians in average.

	Real simulated data						**Reproduction model (Configuration 1)**						**Optimization model (Configuration 2)**					
Period	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Triage Nurse	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
Nurse in short circuit	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	*1*	*1*	*3*	3	3	3
Nurse in long circuit	2	2	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	1	1	3	3	3	3
Nurse (Auxiliary exams)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	3	3	3
Triage Caregiver	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Caregiver in short circuit	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3
Caregiver in long circuit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
Internal in short circuit	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3
Internal in long circuit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
Physician in short circuit	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3
Physician in long circuit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
Beds	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	14	14	13
Performance	116 patients						104 patients						79 patients					

Table 1 : Optimization results for human and material resources

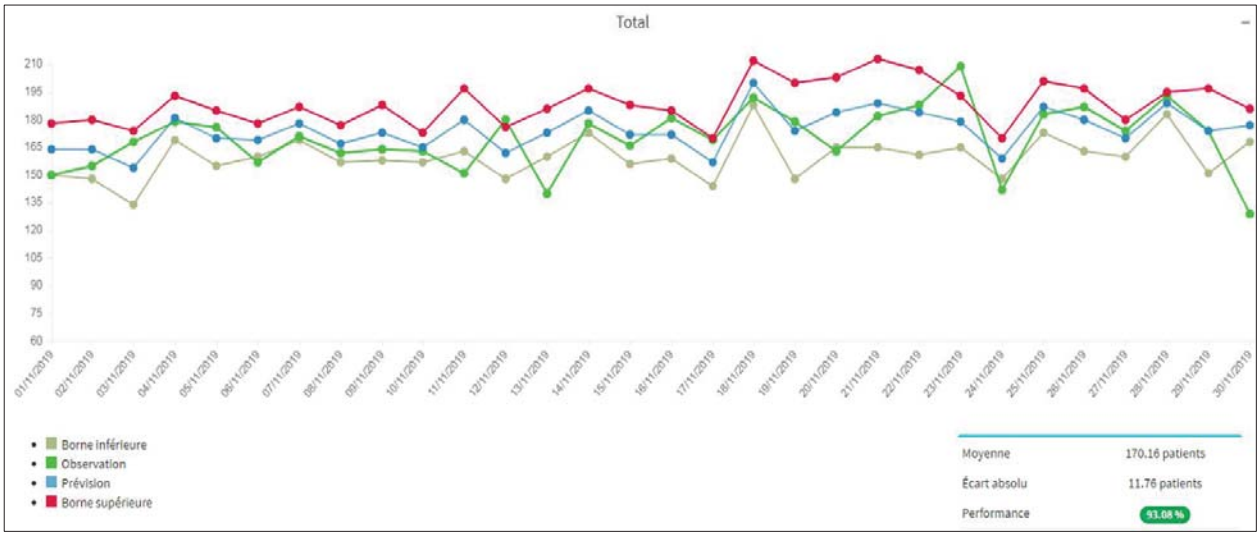


Figure 2: Patient arrival forecasts (Afilal et al [10])

	Physician in short circuit						**Physician in long circuit**						**Performance value**	CPU (seconds)
Period	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
Current configuration	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	146 patients	1.27
Optimal configuration	1	1	3	3	3	3	1	1	2	2	2	2	107 patients	

Table 2: Optimization results for human and material resources considering patient arrival forecasts.

5 CONCLUSION

This paper is about the optimization of human and material resources in the ED of CHT. We proposed a generic approach to appropriately adjust the number of human and material resources from the patient arrival into the ED to the discharge or the assignment to emergency beds, taking into account uncertainties related to the patients' arrival and the services times. We proposed a stochastic MILP solved using a SAA method to determine the optimal allocation of medical and paramedical staff and beds, thus minimizing the total number of waiting patients in all the queues. The program was tested on a set of real data gathered from the ED's information system. The experimental results demonstrated that using the proposed approach could reduce the number of waiting patients. In contrast to most existing works, this paper considers optimizing all the humans and materials resources used in the overall patient process. Moreover, to the best of our knowledge, this is the first work that considers the use of forecasts of patients' arrivals as input data to help the decision maker to schedule daily the human and material resources.

In future work, we will consider testing this approach on other emergency structures in order to evaluate their performances and propose new resource organizations and to take into consideration other uncertainties such as the availability of medical staff, the availability of equipment, etc.

REFERENCES

[1] Cabrera, E., Taboada, M., Iglesias, M. L., Epelde, F., & Luque, E. (2012). Simulation optimization for healthcare emergency departments. Procedia Computer Science, 9, 1464-1473.

[2] EL-Rifai, O., Garaix, T., Augusto, V., & Xie, X. (2015). A stochastic optimization model for shift scheduling in emergency departments. Health care management science, 18(3), 289-302.

[3] Daldoul, D., Nouaouri, I., Bouchriha, H., & Allaoui, H. (2018). A stochastic model to minimize patient waiting time in an emergency department. Operations Research for Health Care, 18, 16-25.

[4] Chouba, I., Arbaoui, T., Amodeo, L., Yalaoui, F., Blua, P., Sanchez, S., & Laplanche, D. (2019). Optimisation du service d'urgences à l'aide d'un modèle de simulation efficace. Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique, 67, S86.

[5] Feng, Y. Y., Wu, I. C., & Chen, T. L. (2017). Stochastic resource allocation in emergency departments with a multi-objective simulation optimization algorithm. Health Care Management Science, 20(1), 55-75.

[6] Ghanes, K., Jouini, O., Jemai, Z., Wargon, M., Hellmann, R., Thomas, V., Koole, G., (2014). A comprehensive simulation modeling of an emergency department: A case study for simulation optimization of staffing levels, in: Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, IEEE Press. pp. 1421–1432.

[7] Ahmed, M.A., Alkhamis, T.M., (2009)(. Simulation optimization for an emergency department healthcare unit in kuwait. European journal of operational research 198, 936–942.

[8] Mazier, A., Xie, X., & Sarazin, M. (2010, August). Scheduling inpatient admission under high demand of emergency patients. In 2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (pp. 792-797). IEEE.

[9] Verweij, B., Ahmed, S., Kleywegt, A. J., Nemhauser, G., & Shapiro, A. (2003). The sample average approximation method applied to stochastic routing problems: a computational study. Computational Optimization and Applications, 24(2-3), 289-333.

[10] Afilal, M., Yalaoui, F., Dugardin, F., Amodeo, L., Laplanche, D., & Blua, P. (2016). Forecasting the emergency department patients flow. Journal of medical systems, 40(7), 17

SERVICE POLICY OPTIMIZATION FOR URBAN PUBLIC TRANSPORT NETWORKS: MOBILITY CONSTRAINTS DURING HEALTH EMERGENCY OF PANDEMIC CYCLES

Ronald M. MARTINOD
Universidad EAFIT
Medellín - Colombia
rmartino@eafit.edu.co

Olivier BISTORIN
ICN Business School Nancy Metz
Metz Technopôle, Metz - France
olivier.bistorin@icn-groupe.fr

Leonel F. CASTAÑEDA
Universidad EAFIT
Medellín - Colombia
lcasta@eafit.edu.co

Nidhal REZG
Université de Lorraine
Ile du Saulcy, Metz - France
Nidhal.rezg@univ-lorraine.fr

ABSTRACT: *This work presents an approach to model the behaviour of urban public transport networks for optimizing the service policy, which includes the effect of mobility constraints on health emergency for pandemic cycles. During health emergencies, local governments strongly use two regulatory policies for contain a disease spreading: (i) social distancing and (ii) restriction of social interaction; these regulatory policies thoroughly affect the urban mobility. We propose the optimization of a stochastic discrete-event model based on a passenger demand analysis by means: (i) a numeric model of a multimodal network considering interdependencies and asymmetries of passengers; (ii) an integration of the regulatory policies for health emergency; and (iii) a process for optimizing the passengers waiting time cost. This work is applied to an actual metropolitan transport network comprised of metro, tramway, and ropeway lines.*

KEYWORDS: *Optimization process, public transport network , system simulation, transportation system, urban system.*

1 INTRODUCTION

Health emergencies on pandemic cycles have massively affected the lives of people all over the world. Countries must take drastic measures to contain outbreaks (de Haas *et al.*, 2020) and they have put in place restrictive measures in order to confine the pandemia and contain the number of casualties. Among the restrictive measures, Urban Public Transport (UPT) constraints are certainly quite effective in reducing the mobility on the local scale in the short term but it also has high social impact on the long and short term (Iacus, 2020). The trend of UPT has been rising over the last decade at a pace that is faster than the population growth (Recchi et al., 2019). Nevertheless, mobility flows have been shaped at regional scale by shocks due to operational and service policies (Gabrielli *et al*., 2019). In addition, UPT has shown strong dependency on pandemia outbreaks in the past such as SARS in 2003, MERS in 2015 (IATA, 2020), and Covid-19 in 2020 (Bucsky, 2020), with effects that had repercussions at local and regional scale.

The circumstances result in situations in which people have had to change their daily life radically. People's activity patterns, the way they work and how they travel are three facets of daily life that have changed drastically. From both a research and social point of view, it is important to assess the mobility to these externally induced changes (de Haas *et al.*, 2020). Researches show that not only travel patterns, but also activity patterns are less stable during pandemic cycles (Hilgert et al., 2018). Daily travel behaviour particularly depends on habit and routine (Schönfelder and Axhausen, 2010). However, several studies have shown that there are certain events in people's life course that trigger change in travel behaviour (Müggenburg et al., 2015; Schoenduwe et al., 2015).

Social distancing measures (the social isolation and the passenger transport restriction) have important effects on the service transport, i.e., the Passenger Waiting Time (PWT). Previous studies (Niu and Zhou, 2013; Barrena *et al.*, 2014) have focused on reducing PWT based on the passenger arrival process at stations with either a uniform process or a Poisson process. Other study (Martinod *et al.*, 2019) proposes a stochastic optimisation model for integrating service and maintenance policies in order to solve the queueing problem and the cost of maintenance activities for UPT, with a particular focus on urban ropeway systems. But, these previous works have considered only single transport line without a Public Transport Network (PTN) context. Our work analyses the intermodality effects integrating a study focused on the mobility constraints on health emergency of pandemic cycles, in which the UPT lines undergoes a remarkable intensity of passengers' flow in one direction over defined periods –people go to work, students go to schools, etc.– generating a strong asymmetric demand of passengers over the PTN. Besides, the merit of our work in is develop a mathematical framework for integrating the service policy of different UPT line modes minimising the PWT cost and considering interdependencies of the passenger demand on intermodal PTNs.

During pandemic cycles, local governments strongly use two constraint policies for contain the virus spreading: (i) social distancing and (ii) restriction of social interaction. Nevertheless, under operational conditions, increasing the social distancing decreases the transport capacity, and as a result increases the PWT; however, increasing the restriction of social interaction decreases the transport demand, and as a result decreases the PWT. The aim is to optimise the PWT for long-term cost of operational service considering regulatory policies. Main contributions of this work can be summarised as follows:

(i) this is the first work that develops a mathematical framework to model multimodal PTNs (comprised by a set of metro, tramway, and ropeway lines) based on stochastic optimization processes that integrate both service restrictions and passenger demand constraints generated by the health emergency, with the aim of solving the travel time; and

(ii) this work proposes a dynamic discrete event model that use interrelated queuing processes to formulate the service problem using a cost-based expression.

Governments and transport operators do not know for certain how long these measures will last and whether or not subsequent waves can be expected. In this viewpoint we offer a service policy optimization for PTNs considering constraints for pandemic health emergencies. The remainder of this work is organised as follows: in Section 2 we expose the detailed problem formulation for different UPT line modes. A stochastic optimisation model for obtaining the optimal service is developed in Section 3. Section 4 presents a case study focused on a passenger demand that was performed at a mass transport system, which consists of a collaborative relationship between metro, tramway and ropeway lines. Finally, Section 5 discusses the results of the research.

Transport operators should consider the service policy. For the remainder of this work, the term service policy refers to the set of operational parameters which affect the passenger service such as vehicle capacity (number of available seating places and standing up places), vehicle density (number of service vehicles on a line), nominal vehicles' speed, distance between the vehicles, and vehicle frequency, which all of these affect the PWT.

2 PROBLEM FORMULATION

Taking an Intermodal Collaborative Transport Net-work (ICTN) perspective assumes that any transport network is more than the sum of its UPT lines (Paulsson et al., 2018). Collaborative transport involves a linked-work PTN, in which the different services policies of each UPT lines are integrated (Ceder, 2007), e.g., (i) a synchronisation between arrival and departure times becomes important in an intermodal transfer station, i.e., users of UPT lines are negatively inclined to transfer if it involves uncertain waiting time, (ii) the flow of users for a UPT line is accommodated by another one, and (iii) the service quality of a UPT line not being affected by the service of another one. From this perspective, the facilitation of intermodal transfers is a key component in achieving full integration of PTNs (Nesheli et al., 2015).

An efficient service of ICTNs should consider the PWT cost. We propose a cost-based approach to quantify the performance of the service policy for each UPT line. This approach has an impact on the passengers' perceptions related to travel comfort (quality on the trip) and economic savings (PWT) as well. Therefore, the cost-based approach represents a comprehensive study through a quantitative analysis, which focuses on user experience during the trip. We analyse the transport demand to evaluate the proper service oriented to users, based on the fact that the queuing theory allows to evaluate the quality of service concerning the requested services. The probability function of passenger arrivals on the jth platform belonging to the ith UPT line behaves as a compound Poisson process $Pa_{j,i,n}$ (Gillen and Hasheminia, 2013) and take values from a finite set of events; thus, given $Pa_{j,i,n}$ as a probability function of discrete-time, the sequence $n = \{1,2,\dots,N\}\ \forall\ n \in t$ is defined as the time sequence between successive events, over each ith UPT bi-directional line, with J stations and platforms designated as $j = \{1,2,\dots,2J\}$, where the start terminal and return terminal are indexed as station 1 and station J, respectively (see Figure 1).

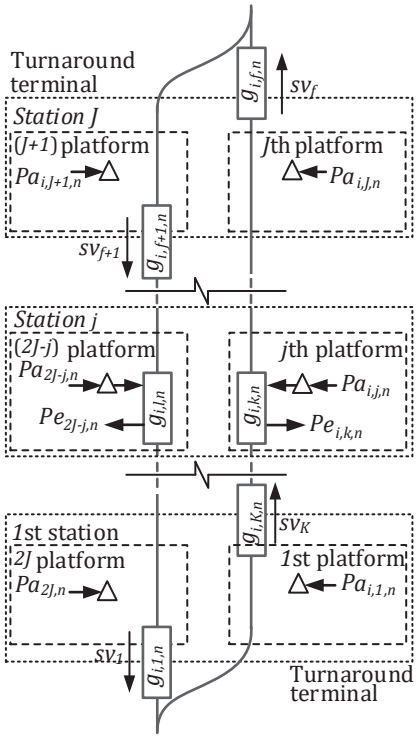


Figure 1: ith UPT line diagram belong to an ICTN.

The discrete-event model deals with the analysis of the PWT aiming to determining its global mean, Wg_i. The proposed model describes the queuing behaviour by means of the ratio between the number of users in the queue, $Lq_{j,i,n}$, and the passengers boarding, $\mu_{j,i,n}$, at the jth platform belonging to the ith UPT line over the nth discretised time

$$Wg_i = \sum_n \left(\mathcal{F}_i \sum_j \frac{Lq_{j,i,n}}{\mu_{j,i,n}} \right) \quad (1)$$

where $\mathcal{F}_i = {f_{j,i,n}}^{-1} \; \forall \, i \in$ (metro or tramway lines) and $\mathcal{F}_i = \left(sv_{k,i,n} \, dv_{i,n} \right)^{-1} \; \forall \, i \in$ (ropeway lines), with $f_{j,i,n}$ as the frequency of vehicle arrival at the platforms, $sv_{k,i,n}$ as the commercial vehicle speed, and $dv_{i,n}$ as the number of vehicles giving commercial service in the ith UPT line.

The discrete-event model is comprised of a set of interrelated queues between UPT lines at the transfer stations (see Figure 2), where κ defines the relationship between the queuing users and the different UPT lines for the ICTN

$$Lq_{j,i,n} = Pa_{j,i,n} + \kappa \sum \sigma_{j',i',n} \; \forall \, j' \neq j \quad (2)$$

The optimal service plan is obtained by minimising the expected Wg_i cost, which represents the basis to assess the set of penalty costs for PWT to the ith UPT line. Formally, the problem is solved through a cost-based model made up of passenger waiting cost, Γ_i. The general relationship to describe the cost function for PWT is expressed as

$$\Gamma_i = f(Wg_i). \quad (3)$$

Methodologies to obtain Γ_i are directly defined by the operation managers of each UPT line, which is quantified in monetary units [mu]. Each UPT line can use different criteria to quantify the penalty cost according to its service policy.

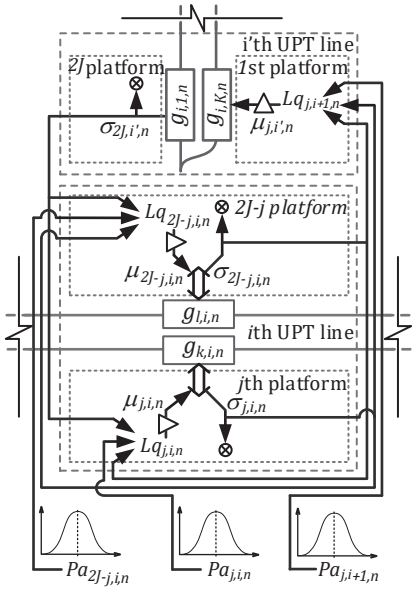


Figure 2: Transfer station between UPT lines.

3 OPTIMISATION PROCESS

A discrete-event formulation is used to describe the queuing, in which the passengers: (i) request a service, $\lambda_{j,i,n}$; (ii) wait in a queue, if necessary, Wg_i; (iii) are serviced, $\mu_{j,i,n}$; and (iv) arrive at their destination, $\sigma_{j,i,n}$. The discrete-event model aims to determinate the Wg_i value considering a set of interrelated queues. This work introduces a stochastic optimisation model for improving the service behaviour of ICTNs by means of the cause-effect relationship between the different service/operational policies for its UPT lines. The objective function related to the service policy cost can be expressed as

$$C^* = \min_n \sum_i \Gamma_i, \quad (4)$$

subject to the following constraints

$$0 \leq g_{k,i,n} \leq cv_{k,i,q}\,, \quad \forall \, k, i \quad (4.a)$$
$$0 \leq \mu_{j,i,n} \leq Lq_{j,i,n}\,, \quad \forall \, j, i, n \quad (4.b)$$
$$0 \leq \sigma_{j,i,n} \leq g_{k,i,n}\,, \quad \forall \, j, i, n \quad (4.c)$$
$$fl_i \leq f_{j,i,n} \leq fu_i\,, \quad \forall \, j, i, n \quad (4.d)$$
$$dl_i \leq dv_{i,n} \leq du_i\,, \quad \forall \, i, n \quad (4.e)$$
$$0 \leq Wg_i \leq Wu_i\,, \quad \forall \, i \quad (4.f)$$
$$\sum_{j,i,n} \lambda_{j,i,n} = \sum_{j,i,n} \sigma_{j,i,n}\,, \quad (4.g)$$
$$0 < k, j, i, n\,, \quad (4.h)$$

where:

Eq. (4.a) highlights that the occupied places in a vehicle, $g_{k,i,n}$, must be lesser than or equal to the vehicle's capacity, $cv_{k,i,q}$; Eq. (4.b) means that $\mu_{j,i,n}$ must be lesser than or equal to $Lq_{j,i,n}$; Eq. (4.c) expresses that the number of passengers disembarking from the vehicle, $\sigma_{j,i,n}$, must be lesser than or equal to $g_{k,i,n}$; Eq. (4.d) is related to an operational condition, which $f_{j,i,n}$ is limited by the range $[fl_{i,n},\ fu_{i,n}]$; Eq. (4.e) refers to another operational condition, which is the system must have a range of vehicles in commercial service $[dl_i,\ du_i]$; Eq. (4.f) is related to a service policy, where Wu_i is the upper limit of the global PWT; Eq. (4.g) indicates that at the end of a full working day, all passengers are served and no one remains within the system.

4 CASE STUDY

This case study is applied to urban public transport network belonging to the ICTN of Medellín city (Co). This ICTN is a rapid transit system mainly comprised of two metro lines, a tramway line and four ropeway (*télécabine*) lines, which are interconnected by means transfer stations for the intermodal connections (see Figure 3). This ICTN has 27 Metro stations, 15 ropeway stations, and 9 tramway stations/stops for a total of 79 stations (+14 stops). All lines operate for 20 hours a day, 7 days a week and 360 days in year.

A set of field measurements, called Origin and Destination Analysis (ODA), were conducted for establishing the passenger demand profile during a typical working-day on 16 August 2018. This date was selected because it was a part of a large-scale measurement protocol for the Medellín metropolitan area, when there were no disturbances (no holidays, no collective vacations, no festivals and no religious ceremonies) during a long time period. During this typical working day, the passenger demand profile has significant fluctuations; thus, it is possible to distinguish that the morning rush hour starts at 5a.m. and ends at 7a.m., while the evening rush hour starts at 5p.m. and

ends at 8p.m. The characteristics of each line are discussed hereafter.



Figure 3: ICTN main lines of Medellín city.

4.1 Metro lines

The metro lines are similar to suburban ET420 trains, it first opened for service in 1995 (Castañeda et al., 2012; Martinod et al. 2012). The vehicle traction in half-load conditions ($5{,}5\ pax/m^2$) is $0{,}95 m/s^2$ and in full-load condition ($8 pax/m^2$) is reduced to $0{,}85 m/s^2$. The vehicle braking in service is in a range $[1{,}6 - 1{,}7] m/s^2$ (Bernal et al, 2016; Martinod et al., 2016). They are comprised by two lines:

(i) *Línea A* crosses the metropolitan area from North to South, which is $25{,}8 km$ long and serves 21 stations; and

(ii) *Línea B* crosses the metropolitan area from downtown to the western district, which is 5.5 kilometres long and serves 6 stations (+1 transfer station with *Línea A*).

4.2 Tramway line

The tramway line (*Línea TA*) is a Translohr rubber-tyred tram system. It started trial operations in 2015 and serves as a feeder line built to connect two ropeways lines (*Línea M* and *Línea H*) from eastern district of the city to a metro line (*Línea A*) at downtown. *Línea TA* runs $4{,}3 km$ with 3 tramway stations (+6 stops).

4.3 Ropeway (télécabine) lines

The ropeway lines belong to a fleet of passenger cable cars comprised of a gondola-type aerial cable on a continuous cycle (Martinod et al., 2014). Both lines are similar in design and construction to those used for passenger tourist transports in winter regions, but serve completely different functions than those for tourists (Martinod et al. 2015). They are comprised by four lines:

(i) *Línea K* provides mobility to the northeaster district of the city since 2004. Its commercial max. speed is $18 km/h$ and the system capacity is $3000 pax/hour$ per direction, spread over 90 cable cars;

(ii) *Línea J* has been operating since 2008. It crosses the central-western district over south-north direction, with a total length of $2{,}7 km$. It has a maximum capacity of $3000\ pax/hour$ per direction with 119 cable cars, a travel time of $12 min.$, with a max. frequency of $12 sec.$ between cable cars and a commercial speed of $18\ km/h$;

(iii) *Línea M* crosses an area of the central-eastern zone of the city from south-north direction, in a total length of $1{,}05\ km$. It has a max. capacity of $2500\ pax/hour$ per direction, 51 cable cars, a travel time of $4 min.$, with a maximum frequency of 9 seconds between cable cars and a commercial speed of $18\ km/h$; and

(iv) *Línea H* was inaugurated in 2016. It crosses an area of the central-eastern zone parallel to *Línea M*, in a total length of $1{,}4 km$. It has a max. capacity of $1800\ pax/hour$ per direction, 44 cable cars, a travel time of $5 min.$, with a maximum frequency of $13 sec.$ between cabins and a commercial speed of $18\ km/h$.

4.4 *Mobility constraints on health emergency*

In March 2020, the World Health Organization (WHO) declared the Covid-19 virus outbreak as a pandemic. The spread of the virus has resulted in a set of variable measures, which have become the newnorms:

(i) social distancing that involves urban transport capacity constraints, Tc, i.e., the transport system capacity (stations, stops, and vehicles) has been limited; and

(ii) restriction of social interaction, Pd, a lot of people have been temporarily unemployed or work from home, and most out-of-home (leisure) activities have been cancelled; thus, passenger demand decreases.

The proposed method provides a stochastic model optimization based on passenger demand analysis, which is applied to a commercial ICTN subject to two regulatory policies for pandemic social isolation: (i) a social distancing

that implies urban transport capacity constraints, and (ii) restriction of activity participation in cities affecting passenger demand. Therefore, the mobility constraints are temporal situations and we can expect that out-of-home activity participation (i.e. travel demand) and the transport system capacity will progressively rise (see Table 1).

Social isolation level	Transport capacity constraint, Tc [%]	Passenger demand restriction, Pd [%]
Hard confinement	85	90
Mandatory confinement	80	80
Flexible isolation	70	60
Smart isolation	65	50

Table 1: Regulatory policies for isolation levels.

5 RESULTS

A numeric model of the ICTN main lines of Medellín city was developed in a virtual environment, which allows to assess the effects of the social isolation levels for a wide range of possible conditions and parameter variations, i.e., predicting the behavior of the occupancy rate for the different transport modes of the UPT lines on each discrete-time. As an example of results, Figure 4 shows (using a color code) the occupancy rate for the UPT lines by means: (i) the number of passengers traveling in the vehicles, $g_{k,i,n}$, and (ii) the number of passengers waiting in the queue on the platforms, $Lq_{j,i,n}$.

Figure 5 shows the projected PWT cost for each ith UPT line after the governmental regulatory policy orders with the different isolation levels; moreover, Figure 5 also shows that the regulatory policy denoted as flexible isolation has the highest PWT cost to the transport system due to the combination of the transport capacity constraint, Tc, and passenger demand restriction, Pd. The metro lines (*Línea A* and *Línea B*) have the lowest service impact during the regulatory policies; indeed, *Línea B* has a null PWT cost in the different social isolation levels, i.e., *Línea B* is enough robust to provide the highest transport service regardless of the regulatory policies. On the other hand, the tramway line has a stable behaviour relative to the regulatory policies; but, the ropeway lines are sensible to different social isolation levels.

A set of tests was carried out for establishing the flow of passengers during a commercial service by means the PWT. Figure 6 presents as an example a set of numerical tests for the flexible isolation policy, in which the rush-hours (i.e. 7h00 and 16h00) has significative peaks due to the passenger demand behavior. Moreover, Figure 6 also shows two different behaviour of PWT for flexible isolation policy: (i) a group with low PWT value comprised of metro and tramway lines (*Línea A*, *Linea B* , *Línea TA*), and a group with high PWT value comprised of ropeway lines (*Línea K*, *Linea J*, *Línea M*, , and *Línea H*).

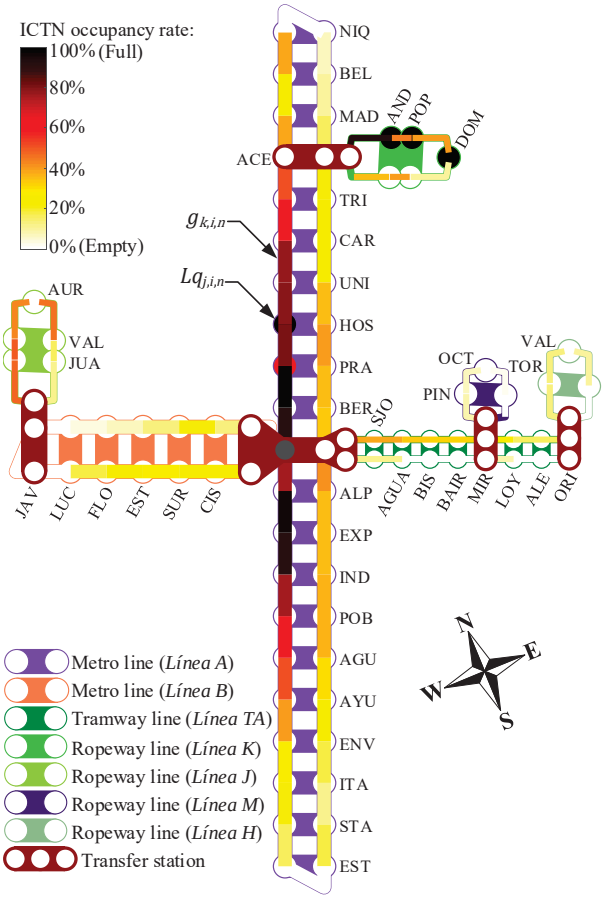


Figure 4: Numerical model for the ICTN.

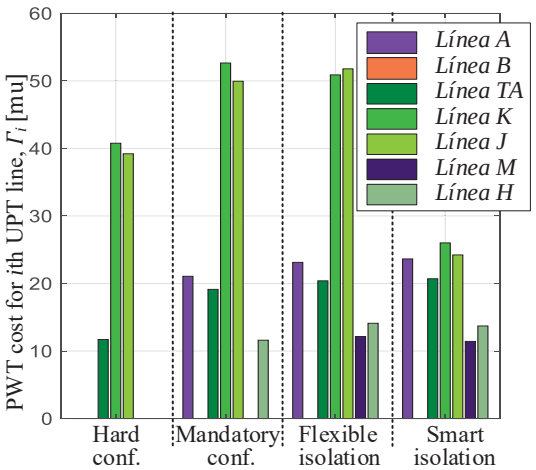


Figure 5: PWT cost for the ith UPT line, Γ_i [mu].

The results of the tests are condensed in Fig. 7, in which the decision variables (Tc, Pd) were considered to obtain the general PWT cost, $\sum_i \Gamma_i$, considering social isolation level; thus, a set of combinatory tests was performed based on the ranges of operation for the ICTN, $Tc = \{62, \dots, 88\}$[%] and $Pd = \{57, \dots, 93\}$[%]. A final analysis was carried out to identify the combination of the values Tc and Pd that must be provided by the ICTN to reach a service policy with minimum PWT cost, C^*, it is obtained by means the local optimums to improve the transport service. Decreasing the transport capacity

constraint and increasing the passenger demand restriction is the approach to obtain the local optimum. Thus, the hard confinement policy should be modified to $C^* = \langle Tc, Pd \rangle^* = \langle 84, 91 \rangle\%$, and the mandatory confinement policy should be modified to $C^* = \langle Tc, Pd \rangle^* = \{78, 81\}\%$.

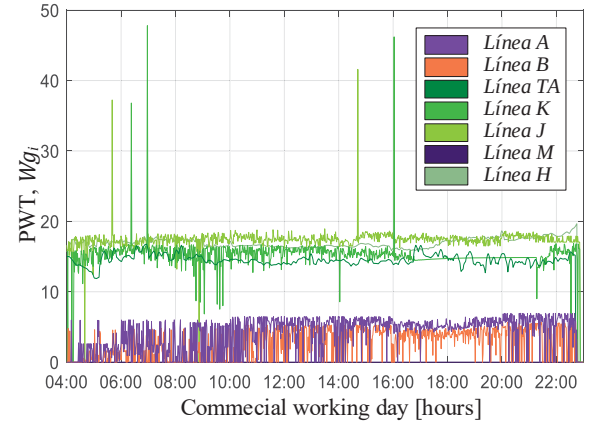


Figure 6: PWT for flexible isolation policy.

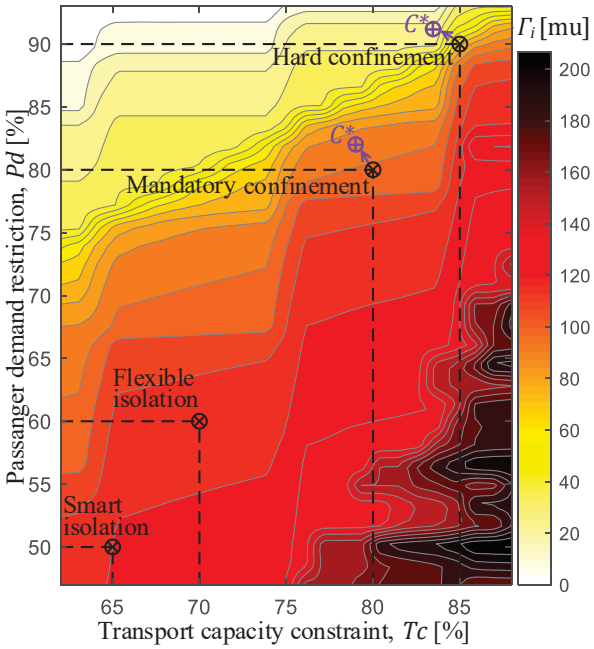


Figure 7: General PWT cost of the ICTN for social isolation level, $\sum_i \Gamma_i$ [mu].

6 CONCLUSIONS

A making decision tool was developed for considering the mobility constraints on health emergency of pandemic cycles to solve the problem of PWT costs involved in different UPT line into ICTNs.

The proposed method provides a stochastic discrete-event model optimization based on passenger demand analysis, which is applied to a commercial ICTN subject to two regulatory policies for pandemic social isolation: (i) social distancing that implies urban transport capacity constraints, and (ii) restriction of social interactions affecting passenger demand.

In the first stage of the work, an ICTN model (two metro, a tramway and four ropeways lines) was developed for obtaining a queue process based on numeric simulations, one that considers the interdependencies and asymmetries of passenger demand. In the second stage, a set of regulatory policies for health emergency of pandemic cycles was integrated to the numeric model. In the final stage of our research, we solve the service problem via a cost-based expression for obtaining a queue process of optimization.

ACKNOWLEDGMENTS

We owe our deepest gratitude to the engineers of the metropolitan transport company of Medellín city who provided us with valuable information and data to carry out this study.

REFERENCES

Barrena, E., Canca, D., Coelho, L.C., Laporte, G., 2014. Exact formulations and algorithm for the train scheduling problem with dynamic demand. *Comp. & Oper. Res.*, 44, 66–74.

Bernal, E.J., Martinod, R.M., Becancur, G.R., Castañeda, L.F., 2016. Partial-profilogram reconstruction method to measure the geometric parameters of wheels in dynamic condition. *Veh. Sys. Dyn.*, 54, 606–616

Bucsky, P., 2020. Modal share changes due to COVID-19: The case of Budapest, *Transp. Res. Interdisc. Perspectives*, 100141.

Castañeda, L.F., Martinod, R.M., Betancur, G.R. (2012) Determination of the technical state of suspension elements based on the OMA-LSCE method. *Ingegnieria Ferroviaria* 2012, Vol. 67 (1), 41−54.

Ceder, A. (2007) Public Transit Planning and Operation: Theory, Modeling and Practice. Elsevier, Butterworth-Heinemann.

De Haas, M., Faber, R., Hamersma, M., 2020. How COVID-19 and the Dutch 'intelligent lockdown' change activities, work and travel behaviour: Evidence from longitudinal data in the Netherlands. *Transp. Res. Interdisc. Perspectives*, 6, 100150.

De Vos, J., 2020. The effect of COVID-19 and subsequent social distancing on travel behaviour. *Transp. Res. Interdisc. Perspectives*, 5 100121.

Gabrielli, L., Deutschmann, E., Natale, F., Recchi, E., Vespe, M., 2019. Dissecting global air traffic data to discern different types and trends of transnational human mobility. *EPJ Data Sci.*, 8 (1), 1–24.

Gillen, D., Hasheminia, H., 2013. Estimating the demand responses for different sizes of air passenger groups. *Transp. Res. Part B*, 49, 24–38.

Hilgert, T., von Behren, S., Eisenmann, C., Vortisch, P., 2018. Are activity patterns stable or variable? Analysis of three-year panel data. *Transp. Res. Rec.*, 2672 (47), 46–56.

Iacus, S.M., Natale, F., Santamaria, C., Spyratos, S., Vespe, M., 2020. Estimating and projecting air passenger traffic during the COVID-19 coronavirus

outbreak and its socio-economic impact. *Safety Sci.*, 129, 104791.

IATA, 2020. What can we learn from past pandemic episodes? https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/what-can-we-learn-from-pastpandemic-episodes/.

Martinod, R.M., Betancur, G.R., Castañeda, L.F., 2012. Evaluation of the damping elements for two stage suspension vehicles. *Ingeniería e Investigación*, 32 (1), 11−17.

Martinod, R.M., Estepa, D., Paris, C.E., Pineda, F.A., Restrepo, J.L., Castaneda, L.F, Mejia, G.A., 2014. Operating conditions effect over the coupling strength for urban aerial ropeways. *Transp. Problems*, 9, (3), 5–14.

Martinod, R.M., Estepa, D., Paris, C.E., Trujillo, A., Pineda, F.A., Castaneda, L.F, Restrepo, J.L., 2015. Journey safety assessment to urban aerial ropeways transport systems based on continuous inspection during operation. *J. of Transp. Safety & Security*, 7, 279–290.

Martinod, R.M., Betancur, G.R., Castañeda, L.F., Restrepo, J.L., 2016. Structural analysis of railways bolster-beam under commercial operation conditions: over-traction and over-braking. *Transp. Problems*, 11(2), 67–77.

Martinod, R.M., Bistorin, O., Castañeda, L.F., Rezg, N., 2019. Joint optimisation of operation and maintenance policies in an urban ropeway transport systems context. *Int. J. of Quality & Reliab. Manag.*, 36 (7), 1106-1136.

Müggenburg, H., Busch-Geertsema, A., Lanzendorf, M., 2015. Mobility biographies: A review of achievements and challenges of the mobility biographies approach and a framework for further research. *J. of Transp. Geography*, 46, 151–163.

Nesheli, M.M., Ceder, A. and Liu, T., 2015. A Robust, Tactic-Based, Real-Time Framework for Public-Transport Transfer Synchronization. *Transp. Res. Procedia*, 9, 246–268.

Niu, H., Zhou, X., Gao, R., 2015. Train scheduling for minimizing passenger waiting time with time-dependent demand and skip-stop patterns: nonlinear integer programming models with linear constraints. *Transp. Res. Part B,* 76, 117–135.

Paulsson, A., Isaksson, K., Sørensen, C.H., Rye, T., Scholten C., 2018. Collaboration in public transport planning–Why, how and what?. *Res. in Transp. Econ.*, 69, 337–385.

Recchi, E., Deutschmann, E., Vespe, M., 2019. Estimating transnational human mobility on a global scale. Robert Schuman Centre for Advanced Studies Research Paper No. RSCAS, 30, 1–10.

Schoenduwe, R., Mueller, M.G., Peters, A., Lanzendorf, M., 2015. Analysing mobility biographies with the life course calendar: a retrospective survey methodology for longitudinal data collection. *J. of Transp Geography*, 42, 98–109.

Schönfelder, S., Axhausen, K., 2010. Urban rhythms and travel behaviour: spatial and temporal phenomena of daily travel. Ashgate publishing, 1–230.

MODÉLISATION DU PROBLÈME DE L'ALLOCATION DES PLANCHES ET DES POSTES À QUAI DANS LES PORTS VRAQUIERS

[1,2]Hamza BOUZEKRI

[1]EMINES - School of Industrial Management, Université Mohammed VI Polytechnique
43150 Ben Guerir - Maroc
hamza.bouzekri@emines.um6p.ma

[1,2]Gülgün ALPAN

[2]Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, CNRS, G-SCOP
38000 Grenoble - France
gulgun.alpan@emines.um6p.ma
gulgun.alpan@grenoble-inp.fr

[1,3]Vincent GIARD

[3]Université Paris-Dauphine, Université PSL
75016 Paris – France
vincent.giard@emines.um6p.ma
vincent.giard@dauphine.psl.eu

RÉSUMÉ : *L'exploitation optimale des ressources portuaires et le respect des clauses des contrats d'affrètement jouent un rôle important dans l'amélioration de la performance de la chaine logistique portuaire. Dans cet article, nous avons intégré le problème tactique de l'allocation des planches avec l'un des plus importants problèmes opérationnels de la gestion portuaire, à savoir le problème de l'allocation des postes à quai. Cette étude est menée dans le contexte des ports vraquiers multiquais dédiés à l'export, en considérant les contraintes liées aux marées qui limitent le départ des grands navires chargés et à l'acheminement des marchandises par convoyeurs depuis les zones de stockages jusqu'aux quais de chargement. Le problème a été modélisé sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers où toutes les contraintes liées aux caractéristiques du port et des navires sont formulées sous forme de prédicats, ce qui améliore notablement la performance numérique du modèle. Ce dernier a été testé et validé par une série de tests numériques basés sur des instances inspirées de données réelles du port minéralier de Jorf Lasfar. Les résultats montrent que le modèle proposé peut être utilisé pour résoudre des instances allant jusqu'à 40 navires en des temps de calcul relativement faibles.*

MOTS-CLÉS : *Gestion portuaire, allocation des planches, allocation des postes à quai, ports vraquiers, marées, convoyeurs.*

1 INTRODUCTION

Le transport maritime joue un rôle crucial dans la mondialisation des économies et la globalisation des entreprises. Aujourd'hui, il représente 80% du commerce mondial en volume. Les vraquiers (navires destinés au transport de marchandises solides en vrac comme les céréales, le charbon, les minerais, etc.) représentent 42,6% de la flotte mondiale contre 28,7% pour les pétroliers (navires destinés au transport du pétrole et de ses dérivées) et 13,4% pour les porte-conteneurs (navires destinés au transport des marchandises emballées et placées dans des conteneurs) (UNCTAD, 2019). Il est donc clair que le vrac solide prédomine le fret maritime.

La performance de la gestion portuaire est liée à la fois à l'exploitation optimale des ressources portuaires (quais, grues, ressources humaines, etc.) et au respect des clauses des contrats d'affrètement. Ces contrats sont conclus entre le fréteur (celui qui donne un navire en location) et l'affréteur (celui qui loue un navire). Ils ont pour objet la mise à disposition d'un navire pendant un temps défini ou un trajet donné en contrepartie d'un paiement nommé le fret. Parmi les clauses présentes dans ce type de contrat, nous citons la planche (*laycan*) et le temps de planche (*laytime*). La planche est une fenêtre de temps datée pendant laquelle le fréteur est tenu de mettre un navire à la disposition de l'affréteur dans le port indiqué. Quant au temps de planche, il s'agit du temps alloué à l'affréteur pour charger sa cargaison sans qu'il ait à payer au fréteur d'autres sommes que celle convenue pour l'affrètement du navire. Quand le temps de chargement dépasse le temps de planche, l'affréteur doit payer une pénalité financière nommée « surestaries » (*demurrage*) au fréteur. Les surestaries ne sont applicables que lorsque le navire du client arrive au port dans sa planche. A contrario, toute fin de traitement antérieure à la date cible générera une prime de célérité (*despatch money*) pour l'affréteur (voir figure 1).

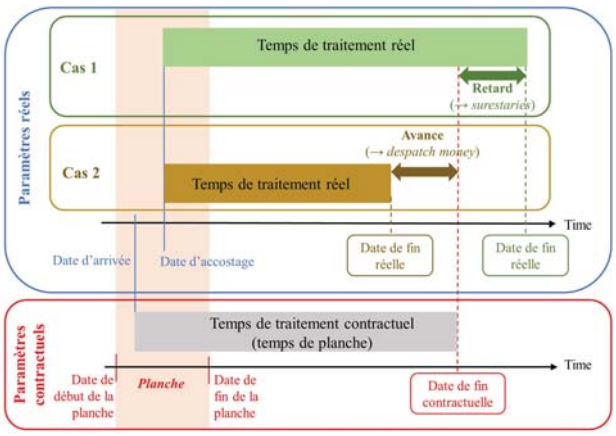


Figure 1 : Paramètres réels vs paramètres contractuels d'un navire

Le problème tactique de l'allocation des planches (*Laycan Allocation Problem* : LAP) génère une affectation de plages de temps aux navires durant lesquelles leur accostage est possible sur un horizon de planification à moyen terme de quelques semaines. Cette affectation doit prendre en considération la disponibilité des marchandises à charger dans les navires et des quais, d'où son interaction avec le problème opérationnel de l'allocation des postes à quai (*Berth Allocation Problem* : BAP). Ce dernier génère un programme d'accostage qui détermine où un navire doit accoster dans le port et sur quelle plage de temps, sur un horizon de planification à court terme de quelques jours. Ce programme doit optimiser le séjour des navires en rade et à quai en prenant en compte la disponibilité datée des quais, leurs caractéristiques (longueur, profondeur, etc.) et celles des navires (taille, tirant d'eau, etc.).

Dans cet article, nous étudions le problème intégré de l'allocation des planches et des postes à quai (*Integrated Laycan and Berth Allocation Problem* : LBAP) dans le contexte des ports vraquiers multiquais dédiés à l'export. L'objectif est d'aider les gestionnaires des ports à choisir les planches optimales pour les nouveaux navires à affréter tout en tenant compte des décisions relatives aux allocations des postes à quai en faveur des nouveaux navires déjà affrétés, de tel façon à maximiser leurs primes de célérité et réduire leurs surestaries.

La différence clé entre les ports vraquiers et les ports à conteneurs, c'est que dans les ports vraquiers, il est nécessaire de considérer le type de marchandise transporté par les navires ainsi que les contraintes liées aux équipements de transport installés dans le port (convoyeurs pour vrac solide et pipelines pour vrac liquide). Par conséquent, nous avons considéré les contraintes liées à l'acheminement des marchandises en vrac solide par convoyeurs depuis les zones de stockages jusqu'aux quais de chargement. Nous avons aussi considéré les contraintes liées aux marées qui limitent le départ des grands navires chargés. De plus, pour réduire le gap entre la représentation abstraite du problème étudié et son applicabilité dans des situations réelles, nous avons considéré de nombreux aspects à savoir des navires multicargos, des postes à quai dotés d'équipements hétérogènes et les clauses présentes dans les contrats d'affrètement.

Le reste de l'article est organisé comme suit : la section 2 contient une revue de littérature des problèmes de l'allocation des planches et des postes à quai dans le contexte des ports vraquiers. Les sections 3 et 4 sont dédiées respectivement à la description et la formulation mathématique du problème intégré de l'allocation des planches et des postes à quai. La section 5 décrit les tests numériques réalisés ainsi que leurs résultats. Enfin, la section 6 est dédiée aux conclusions et perspectives de recherche.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Le BAP dans le contexte des ports vraquiers a reçu moins d'attention dans la littérature de la recherche opérationnelle par rapport aux ports à conteneurs. De plus, dans les études précédentes, le BAP et le LAP sont résolus séparément. Nous avons étudié ces deux problèmes conjointement dans le contexte des ports à conteneurs dans (Bouzekri *et al.*, 2019a, 2019b). Au meilleur de notre connaissance, aucune étude précédente n'a intégré ces deux problèmes dans le contexte des ports vraquiers.

2.1 Littérature du BAP

Il existe une multitude de formulations possibles pour le BAP selon les contraintes spatiales et temporelles prises en compte dans le problème. L'attribut spatial concerne la disposition des quais (discrète, continue ou hybride) et leur profondeur tandis que l'attribut temporel décrit le processus d'arrivée des navires (arrivées statiques, dynamique, stochastiques ou cycliques) et leur temps de traitement (fixes, stochastiques, varient selon la position d'accostage, le nombre de grues allouées ou leur ordonnancement). Pour résoudre le BAP, la plupart des auteurs utilisent des méthodes exactes, des heuristiques et des métaheuristiques (algorithmes génétiques, recherche tabou, recuit simulé, etc.).

Peu d'articles sur le BAP dans le contexte des ports vraquiers trouvés dans la littérature sont résumés ci-dessous. (Umang *et al.*, 2013) ont étudié le BAP dans sa version hybride et dynamique en considérant le type de la cargaison et le tirant d'eau des navires. Afin d'améliorer les allocations des postes à quai, les auteurs ont proposé une métaheuristique basée sur une méthode d'optimisation appelée « *Squeaky wheel* ». (Ernst e*t al.*, 2017) ont résolu le BAP dans sa version continue et dynamique en considérant les contraintes liées aux marées qui limitent le départ des grands navires chargés. En revanche, (Barros *et al.*, 2011) ont résolu le BAP dans sa version discrète et dynamique en considérant des postes homogènes et les contraintes liées aux marées et aux niveaux de stock des minerais à charger, en privilégiant les navires dont le niveau de stock est le plus critique. Les auteurs ont aussi proposé une heuristique basée sur le recuit simulé.

Puisque l'allocation des postes à quai est liée à la gestion des zones de stockage, certains auteurs ont intégré le BAP avec le problème de l'allocation des zones de stockage (*Yard Assignment Problem :* YAP). En effet, (Robenek *et al.*, 2014) ont étendu le BAP dans sa version hybride et dynamique pour prendre en compte l'allocation des zones de stockage, sous l'hypothèse que les navires sont mono-cargo. Pour résoudre ce problème, les auteurs ont proposé un algorithme basé sur la méthode du Branch-and-Price et une métaheuristique basée sur la recherche du « *Critical-Shaking Neighborhood* ». De même, (Unsal et Oguz, 2019) ont proposé un programme linéaire mixte pour le problème qui intègre le BAP dans sa version discrète et dynamique avec le YAP en ajoutant des décisions relatives à l'ordonnancement

des récupérateurs (de grandes machines utilisées pour récupérer les matières en vrac solide).

Dans la même logique d'intégration de problèmes, (Pratap *et al.*, 2017) ont développé un système d'aide à la décision pour résoudre le problème de l'allocation des postes et des déchargeurs des navires. Quant à (Menezes *et al.*, 2017), ils ont intégré des problèmes d'ordonnancement et de planification de la production avec politique FIFO (*First In, First Out*) pour l'accostage des navires. Ce problème combiné définit la quantité et la destination de chaque ordre d'entrée ou de sortie entre la réception, les zones de stockage et les postes à quai, en établissant un ensemble de routes faisables entre ces trois sous-systèmes, pour garantir le stockage et l'expédition à temps des marchandises et la réduction des couts opérationnels.

2.2 Littérature du LAP

Un seul article a été trouvé dans la littérature qui traite le LAP. Il s'agit de (Lorenzoni *et al.*, 2006) qui ont développé un modèle mathématique basé sur un problème d'ordonnancement à ressources limitées au contexte multimode. Leur modèle détermine les planches des navires sous une utilisation efficace des ressources portuaires (postes d'accostage, chenal d'accès, etc.). Par conséquent, les planches proposées doivent éviter les arrivées simultanées ou quasi-simultanées des navires concurrentiels pour des mêmes ressources. Cependant, les auteurs ont seulement considéré l'allocation temporelle de ces ressources sans considérer les contraintes spatiales telle la longueur des postes et des navires. Enfin, ils ont résolu le problème avec une heuristique basée sur un algorithme à évolution différentielle.

Dans cet article, nous étendons le BAP dans un contexte de ports vraquiers, pour décider à la fois de l'allocation des postes à quai pour tous les navires et l'allocation des planches pour les nouveaux navires à affréter en considérant les contraintes spatiotemporelles.

3 DESCRIPTION DU PROBLÈME

Nous considérons un port vraquier multiquais dédié à l'export. La disposition retenue des quais est la disposition hybride où chaque quai est divisé en un nombre de postes de différentes longueurs et chaque grand navire peut occuper plus d'un poste, cependant, les petits navires ne peuvent pas partager un même poste. Dans la figure 2, le grand navire 3 occupe le poste 5 composé des postes 3 et 4.

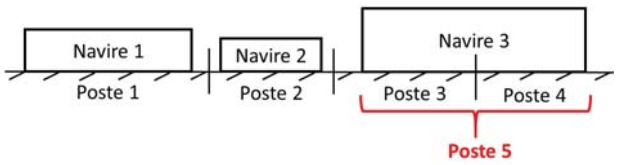


Figure 2 : Quai de disposition hybride

Chaque poste est caractérisé par une longueur, une profondeur minimale et un équipement de chargement caractérisé à son tour par une productivité. La figure 3 représente un port composé de 4 quais de différentes longueurs et profondeurs (la profondeur des postes croit en s'éloignant de la terre) avec des équipements de chargement hétérogènes.

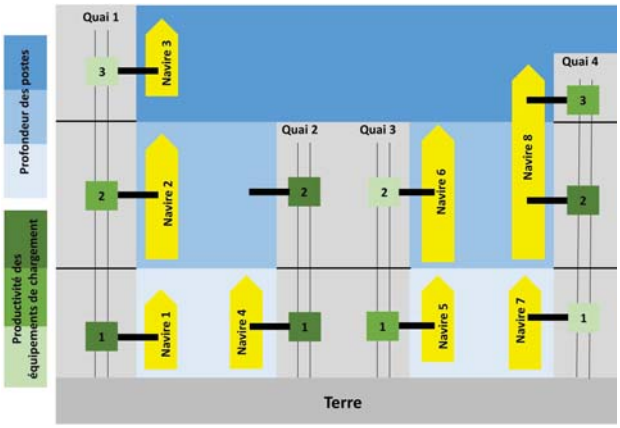


Figure 3 : Représentation du port

Tous les quais du port sont liés aux hangars de stockage par un système de convoyage. Ce dernier peut être divisé en sections composées de différents nombres de convoyeurs identiques et parallèles (voir figure 4).

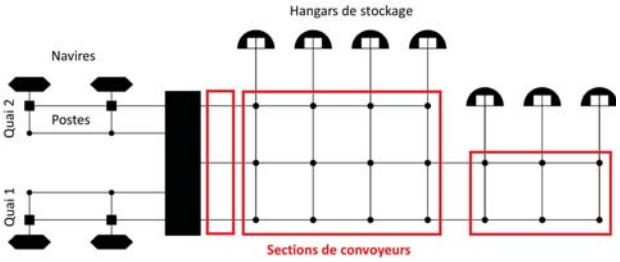


Figure 4 : Système de convoyage du port

Chaque navire est caractérisé par une date d'arrivée prévisionnelle (arrivées dynamiques), une longueur, un tirant d'eau, un nombre de lots de marchandises de différentes quantités à charger dedans et un temps d'attente maximal en rade. Le rôle de ce dernier est d'éviter des solutions irréelles avec de très grands temps d'attente en rade. De plus il permet de réduire l'espace de solutions des dates d'accostage dans l'horizon de planification, ce qui améliore la performance numérique du modèle. Les nouveaux navires à affréter ont un temps d'attente en rade assez grand pour ne pas modifier les résultats des navires déjà affrétés car ces derniers sont prioritaires puisque leur contrat d'affrètement est déjà finalisé. Le temps de chargement des navires dépend de leur poste d'accostage. Ceci est dû à la productivité de l'équipement de chargement présent sur ce poste. Les navires sont caractérisés par leurs clauses contractuelles à savoir le temps de chargement contractuel et les coefficients horaires de despatch et de surestarie. Nous prenons aussi en compte les contraintes techniques des navires qui obligent ou interdisent l'accostage des navires dans des postes spécifiques.

Chaque lot de marchandise est caractérisé par une date de disponibilité et un hangar de stockage. Les lots à charger dans un même navire ne sont pas forcément stockés dans le même hangar. De plus, il est interdit de charger deux lots en même temps depuis un même hangar de stockage ou bien dans un même navire. Nous supposons que les lots sont chargés sans temps d'arrêt dans le navire et dans n'importe quel ordre. Dans la figure 5, le navire et les lots chargés dedans sont représentés par des rectangles. Le navire est représenté par un grand rectangle qui commence à partir de sa date d'accostage, se situe dans la zone de son poste d'accostage (poste 2) et a comme longueur la somme des temps de chargement des lots chargés dedans. Ces derniers sont représentés par des petits rectangles dans le rectangle du navire et ont comme longueur leur temps de chargement avec la mention de leur hangar de stockage.

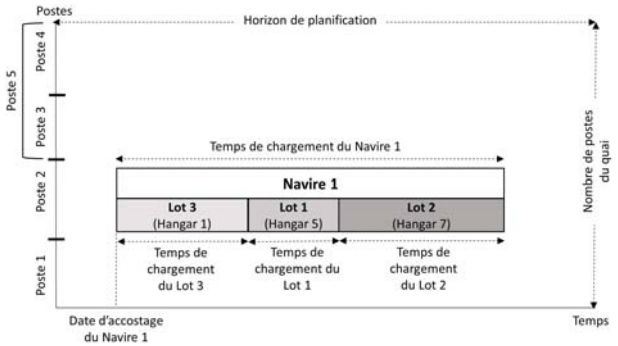


Figure 5 : Représentation d'un navire et des lots chargés dedans

Enfin, nous prenons en considération les contraintes liées aux marées. En effet, quand les navires de grande taille sont chargés, leur tirant d'eau dépasse le niveau de la mer durant les marées basses et ne peuvent pas donc quitter le port. Par conséquent, ils doivent attendre que la marée devienne plus haute afin que leur tirant d'eau soit inférieur au niveau de la mer. Les navires de petite et moyenne taille sont indépendants de la marée et peuvent donc quitter le port à n'importe quel moment. Par conséquent, nous avons défini la date de début et de fin de chaque marée haute durant l'horizon de planification. Les navires de grande taille ne peuvent donc quitter le port que durant ces fenêtres de temps prédéterminés.

4 FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

4.1 Notation

Indices et Ensembles	
t	Indice des périodes de temps avec un découpage horaire $\mathscr{T} = \{1,...,T\}$.
n	Indice des navires $\mathscr{N} = \{1,...,N\}$ avec $\mathscr{N} = \mathscr{N}_1 \cup \mathscr{N}_2 \cup \mathscr{N}_3$ et $N = N_1 + N_2 + N_3$. • $\mathscr{N}_1 = \{1,...,N_1\}$: ensemble des navires déjà accostés ; • $\mathscr{N}_2 = \{N_1+1,...,N_1+N_2\}$: ensemble des navires déjà affrétés ; • $\mathscr{N}_3 = \{N_1+N_2+1,...,N\}$: ensemble des nouveaux navires à affréter.
i_n	Indice des lots à charger dans le navire n $\mathscr{I}_n = \{1,...,I_n\}$.
p	Indice des postes $\mathscr{P} = \{1,...,P\}$.
s	Indice des sections composées de convoyeurs identiques et parallèles $\mathscr{S} = \{1,...,S\}$.
h	Indice des hangars de stockage $\mathscr{H} = \{1,...,H\}$.
Paramètres	
R_t	1 si la période t se produit durant une marée haute, 0 sinon.
L_p	Longueur du poste p.
W_p	Profondeur minimale du poste p.
$E_p^{p'}$	1 si les postes p et p' partagent un même poste et donc ne peuvent pas être utilisés en même temps, 0 sinon (exemple : dans les figure 2 et 5, les postes 3 et 5 partagent le poste 3). Si $p = p'$, $E_p^{p'} = 1$.
F_{hps}	1 si un des convoyeurs qui lient le hangar h au poste p appartient à la section s, 0 sinon.
U_s	Nombre de convoyeurs identiques et parallèles dans la section s (exemple : dans la figure 4, la section à droite est composée de 2 convoyeurs identiques et parallèles).
$H_n^{i_n}$	Hangar de stockage du lot i_n à charger dans le navire n.
$K_n^{i_n}$	Date de disponibilité du lot i_n à charger dans le navire n.
A_n	Date d'arrivée du navire déjà affrété $(n \in \mathscr{N}_2)$. $A_n = 1, \forall n \in \mathscr{N}_1$ et $A_n = \min_{i_n} K_n^{i_n}, \forall n \in \mathscr{N}_3$.
M_n	Temps d'attente maximal en rade du navire n.
λ_n	Longueur du navire n.
D_n	Tirant d'eau du navire n.
$\theta_{np}^{i_n}$	Temps de chargement du lot i_n dans le navire n accosté au poste p. $\theta_{np}^{i_n}$ = le tonnage du lot i_n / la productivité du poste p.
O_{np}	Temps de chargement du navire n accosté au poste p : $O_{np} = \sum_{i_n \in \mathscr{I}_n} \theta_{np}^{i_n}, \forall n \in \mathscr{N}, \forall p \in \mathscr{P}$.
J_n	Temps de chargement contractuel du navire n.
B_n	Jours de planche du nouveau navire à affréter $(n \in \mathscr{N}_3)$. Ces jours sont ajoutés aux temps de chargement planifié et contractuel des nouveaux navires à affréter: $O_{np} + B_n - 1$ et $J_n + B_n - 1$.
Q_{np}	1 si le navire n peut accoster au poste p, 0 sinon.
ω_n	1 si le navire n dépend de la marée haute en quittant le port, 0 sinon.

δ_n	Date de fin de chargement contractuelle du navire n : $\delta_n = \mathrm{A}_n + \mathrm{J}_n - 1, \forall n \in \mathcal{N}$.
α_n	Coefficient horaire de surestarie du navire n. $\alpha_n = 0, \forall n \in \mathcal{N}_1$ et $\alpha_n = 1, \forall n \in \mathcal{N}_3$.
β_n	Coefficient horaire de despatch du navire n. $\beta_n = 0, \forall n \in \mathcal{N}_1$ et $\beta_n = 1, \forall n \in \mathcal{N}_3$.
Variables de décision	
x_{npt}	1 si le navire n accoste au poste p durant la période t, 0 sinon.
$y_{npth}^{i_n}$	1 si le lot i_n stocké dans le hangar h, commence à être chargé pendant la période t dans le navire n accosté au poste p.
u_n	Entière, retard du navire n. Il s'agit du temps perdu par rapport au temps de planche.
w_n	Entière, avance du navire n. Il s'agit du temps gagné par rapport au temps de planche.

Tableau 1 : Ensemble des notations du modèle

4.2 Description des prédicats

La variable de décision x_{npt} détermine :

- Pour chaque navire déjà affrété ($n \in \mathcal{N}_2$) : son poste d'accostage p et sa date d'accostage t.
- Pour chaque nouveau navire à affréter ($n \in \mathcal{N}_3$) : son poste d'accostage p et sa planche $[t, t + \mathrm{B}_n - 1]$.

L'existence de la variable de décision x_{npt} est conditionnée par cinq conditions :

1) Le navire n doit pouvoir accoster au poste p : $\mathrm{Q}_{np} = 1$.
2) La longueur du navire n ne doit pas dépasser la longueur du poste p : $\lambda_n \le \mathrm{L}_p$.
3) Le tirant d'eau du navire n ne doit pas dépasser la profondeur minimale du poste p : $\mathrm{D}_n \le \mathrm{W}_p$.
4) Le navire n doit accoster après sa date d'arrivée sans dépasser son temps d'attente maximal en rade : $\mathrm{A}_n \le t \le \mathrm{A}_n + \mathrm{M}_n$.
5) Le navire n dont le tirant d'eau est grand ($\omega_n = 1$) doit quitter le poste p durant les marées hautes : $(1\text{-}\omega_n) + \omega_n \cdot \mathrm{R}_{(t + \mathrm{O}_{np} - 1)} = 1$.

Les conditions logiques de l'existence de la variable de décision x_{npt} sont donc les suivantes (remarque : pour faciliter la lecture du modèle mathématique, chaque condition logique est exprimée par une notation $\boldsymbol{C}_a^b$ où $a = np, npt, ni_n pt, ni_n h$ et $b = 1, ..., 4$) :

$x_{npt} \in \{0,1\}, \forall n \in \mathcal{N}$,

$\forall p \in \mathcal{P} \left| \left[\mathrm{Q}_{np} = 1 \wedge \lambda_n \le \mathrm{L}_p \wedge \mathrm{D}_n \le \mathrm{W}_p \right] \Leftrightarrow \boldsymbol{C}_{np}^1 \right.$,

$\forall t \in \mathcal{T} \left| \left[\mathrm{A}_n \le t \le \mathrm{A}_n + \mathrm{M}_n \wedge (1\text{-}\omega_n) + \omega_n \cdot \mathrm{R}_{(t + \mathrm{O}_{np} - 1)} = 1 \right] \right.$

$\Leftrightarrow \boldsymbol{C}_{npt}^2$.

La variable de décision $y_{npth}^{i_n}$ détermine pour chaque lot i_n stocké dans le hangar h, sa date de début de chargement t dans le navire n accosté au poste p.

L'existence de la variable de décision $y_{npth}^{i_n}$ est conditionnée par six conditions :

1) Les conditions 1, 2 et 3 de l'existence de la variable de décision x_{npt}.
4) Le lot i_n peut être chargé entre la date d'arrivée et la date de fin de traitement du navire n s'il a atteint son temps d'attente maximal en rade, moins le temps de traitement du lot : $\mathrm{A}_n \le t \le \mathrm{A}_n + \mathrm{M}_n + \mathrm{O}_{np} - \theta_{np}^{i_n}$.
5) Le lot i_n doit être chargé dans le navire n après sa date de disponibilité : $t \ge \mathrm{K}_n^{i_n}$.
6) Le lot i_n est chargé dans le navire n depuis son hangar de stockage h : $h = \mathrm{H}_n^{i_n}$.

Les conditions logiques de l'existence de la variable de décision $y_{npth}^{i_n}$ sont donc les suivantes :

$y_{npth}^{i_n} \in \{0,1\}, \forall n \in \mathcal{N}, \forall i_n \in \mathcal{I}_n$,

$\forall p \in \mathcal{P} \left| \boldsymbol{C}_{np}^1 \right.$,

$\forall t \in \mathcal{T} \left| \left[\mathrm{A}_n \le t \le \mathrm{A}_n + \mathrm{M}_n + \mathrm{O}_{np} - \theta_{np}^{i_n} \wedge t \ge \mathrm{K}_n^{i_n} \right] \Leftrightarrow \right.$

$\boldsymbol{C}_{ni_n pt}^3$,

$\forall h \in \mathcal{H} \left| \left[h = \mathrm{H}_n^{i_n} \right] \Leftrightarrow \boldsymbol{C}_{ni_n h}^4 \right.$.

En conditionnant l'existence des variables de décision x_{npt} et $y_{npth}^{i_n}$ au respect des conditions citées ci-dessus, il est inutile d'introduire dans le modèle des relations de prises en compte de ces types de contraintes, ce qui améliore notablement sa performance numérique.

4.3 Modèle mathématique

Le modèle du LBAP peut être formulé comme suit :

$$Max \sum\nolimits_{n \in \mathcal{N}} (\beta_n \cdot w_n - \alpha_n \cdot u_n) \quad (1)$$

Soumis à :

$$\sum\nolimits_{p \in \mathcal{P} \left| \boldsymbol{C}_{np}^1 \right.} \sum\nolimits_{t \in \mathcal{T} \left| \boldsymbol{C}_{npt}^2 \right.} x_{npt} = 1, \forall n \in \mathcal{N} \quad (2)$$

$$\sum_{p\in\mathscr{P}}\left|\boldsymbol{C}^1_{np}\sum_{t\in\mathscr{T}}\left|\boldsymbol{C}^3_{ni_n pt}\sum_{h\in\mathscr{H}}\left|\boldsymbol{C}^4_{ni_n h}\, y^{i_n}_{npth}=1,\right.\right.\right. \quad \forall n\in\mathscr{N},\forall i_n\in\mathscr{I}_n \quad (3)$$

$$\mu_n=\eta^{i_n}_n,\forall n\in\mathscr{N},\forall i_n\in\mathscr{I}_n \quad (4)$$

$$\rho^{i_n}_n\geq\varepsilon_n,\forall n\in\mathscr{N},\forall i_n\in\mathscr{I}_n \quad (5)$$

$$\sigma^{i_n}_n\leq\tau_n,\forall n\in\mathscr{N},\forall i_n\in\mathscr{I}_n \quad (6)$$

$$\sum_{i_n\in\mathscr{I}_n}\sum_{p\in\mathscr{P}}\left|\boldsymbol{C}^1_{np}\sum_{t'\in\mathscr{T}}\left|t'\leq t\leq t'+\theta^{i_n}_{np}-1\wedge\boldsymbol{C}^3_{ni_n pt'}\right.\right. \sum_{h\in\mathscr{H}}\left|\boldsymbol{C}^4_{ni_n h}\, y^{i_n}_{npt'h}\leq 1,\forall t\in\mathscr{T},\forall n\in\mathscr{N}\right. \quad (7)$$

$$\sum_{n\in\mathscr{N}}\sum_{i_n\in\mathscr{I}_n}\left|\boldsymbol{C}^4_{ni_n h}\sum_{p\in\mathscr{P}}\left|\boldsymbol{C}^1_{np}\right.\right. \sum_{t'\in\mathscr{T}}\left|t'\leq t\leq t'+\theta^{i_n}_{np}-1\wedge\boldsymbol{C}^3_{ni_n pt'}\, y^{i_n}_{npt'h}\leq 1,\forall t\in\mathscr{T},\forall h\in\mathscr{H}\right. \quad (8)$$

$$\sum_{n\in\mathscr{N}}\sum_{i_n\in\mathscr{I}_n}\sum_{p\in\mathscr{P}}\left|\boldsymbol{C}^1_{np}\sum_{t'\in\mathscr{T}}\left|t'\leq t\leq t'+\theta^{i_n}_{np}-1\wedge\boldsymbol{C}^3_{ni_n pt'}\right.\right. \sum_{h\in\mathscr{H}}\left|\mathrm{F}_{hps}=1\wedge\boldsymbol{C}^4_{ni_n h}\, y^{i_n}_{npt'h}\leq \mathrm{U}_s,\forall t\in\mathscr{T},\forall s\in\mathscr{S}\right. \quad (9)$$

$$\sum_{n\in\mathscr{N}}\sum_{p'\in\mathscr{P}}\left|\mathrm{E}^{p'}_{p}=1\wedge\boldsymbol{C}^1_{np'}\right. \sum_{t'\in\mathscr{T}}\left|t'\leq t\leq t'+\mathrm{O}_{np'}-1\wedge\boldsymbol{C}^2_{np't'}\, x_{np't'}\leq 1,\forall t\in\mathscr{T},\forall p\in\mathscr{P}\right. \quad (10)$$

$$u_n\geq\tau_n-\delta_n,\forall n\in\mathscr{N} \quad (11)$$

$$w_n\geq\delta_n-\tau_n,\forall n\in\mathscr{N} \quad (12)$$

$$u_n-w_n=\tau_n-\delta_n,\forall n\in\mathscr{N} \quad (13)$$

$$u_n,w_n\geq 0,\forall n\in\mathscr{N} \quad (14)$$

La fonction-objectif (1) maximise la somme des différences entre les primes de célérité et les surestaries des navires. L'équation (2) assure que chaque navire *n* accoste à un unique poste *p* durant une unique période de temps *t*. Les navires déjà accostés ont une période d'accostage $t=1$ et un poste d'accostage prédéterminé. L'équation (3) assure que chaque lot i_n soit chargé dans un unique navire *n*. L'équation (4) assure que le poste d'accostage *p* soit le même dans les deux variables de décision x_{npt} et $y^{i_n}_{npth}$. L'équation (5) assure que le chargement du lot i_n ne puisse commencer qu'une fois le navire *n* accosté. L'équation (6) assure que le navire *n* ne puisse quitter le port qu'une fois que tous les lots sont chargés dedans. L'équation (7) assure que deux lots ou plus ne puissent être chargés en même temps dans le navire *n*. L'équation (8) assure qu'au maximum un lot puisse quitter le hangar de stockage *h*. L'équation (9) limite le nombre de convoyeurs à utiliser simultanément dans une même section de convoyeurs *s*. L'équation (10) évite le chevauchement des navires dans un même poste *p* et interdit l'utilisation simultanée de postes qui partagent un même poste. Enfin, les équations (11)-(14) déterminent le retard et l'avance de chaque navire *n*. En effet, si le navire accoste à un poste à forte productivité, son temps de chargement sera inférieur au temps de chargement contractuel et par la suite il sera en avance. A contrario, si le navire accoste à un poste à faible productivité ou bien s'il arrive avant la date de disponibilité du lot qu'il doit exporter, il sera en retard.

5 TESTS NUMÉRIQUES

Les tests numériques ont été effectués sur un ordinateur avec un processeur Intel® Core™ i5-6267U CPU @ 2.90 GHz et 2 Go RAM. Le logiciel de résolution utilisé est le solveur d'optimisation commercial Xpress-IVE sous la version 1.24.24 64 bit.

5.1 Génération des données d'entrée

Les instances des tests ont été générées en se basant sur un échantillon de données fourni par le Groupe OCP, leader mondial des produits phosphatés. Ce dernier opère 6 quais dans le port de Jorf Lasfar, plus grand port minéralier de l'Afrique, pour importer le soufre et l'ammoniac et exporter la roche de phosphate, l'acide phosphorique et les engrais. L'échantillon de données reçu fournit des informations sur les navires qui ont accosté aux 2 quais dédiés au chargement des engrais durant l'année 2019. Chacun de ces deux quais est de disposition hybride et partitionné en 5 postes hétérogènes. Chaque poste est caractérisé par une longueur et une profondeur minimale. Les différentes caractéristiques des postes à quai sont présentées dans le tableau 2.

	Poste	Longueur (m)	Profondeur (m)	Productivité (t/h)
Quai 1	1	180	13,5	2000
	2	255	14,5	2000
	3	150	15,6	1000
	4	150	15,6	1000
	$5=3\cup4$	300	15,6	2000
Quai 2	6	180	13,5	2000
	7	235	14,5	2000
	8	125	14,5	2000
	9	125	15,6	2000
	$10=8\cup9$	250	14,5	4000

Tableau 2 : Caractéristiques des postes à quai

Les engrais produits par le Groupe OCP dans le site de Jorf Lasfar (de l'ordre de 50 types d'engrais) sont stockés dans 9 hangars. Tous les hangars sont liés à tous les postes à quai par un système de convoyage divisé en 3 sections composées de convoyeurs identiques et parallèles $\mathrm{U}_s=\{2,\ 3,\ 3\}$.

Nous avons considéré 3 jeux de données de 5 instances chacun. Chaque jeu est caractérisé par une taille de navires différente $N = \{20, 30, 40\}$ pour un horizon de planification de 20 jours discrétisé en unité horaire $T = 480$ h. Un exemple du résultat du modèle est illustré dans la figure 6. Les jeux de données et leurs résultats sont publiés dans (Bouzekri *et al.*, 2020) sur le site Mendeley.

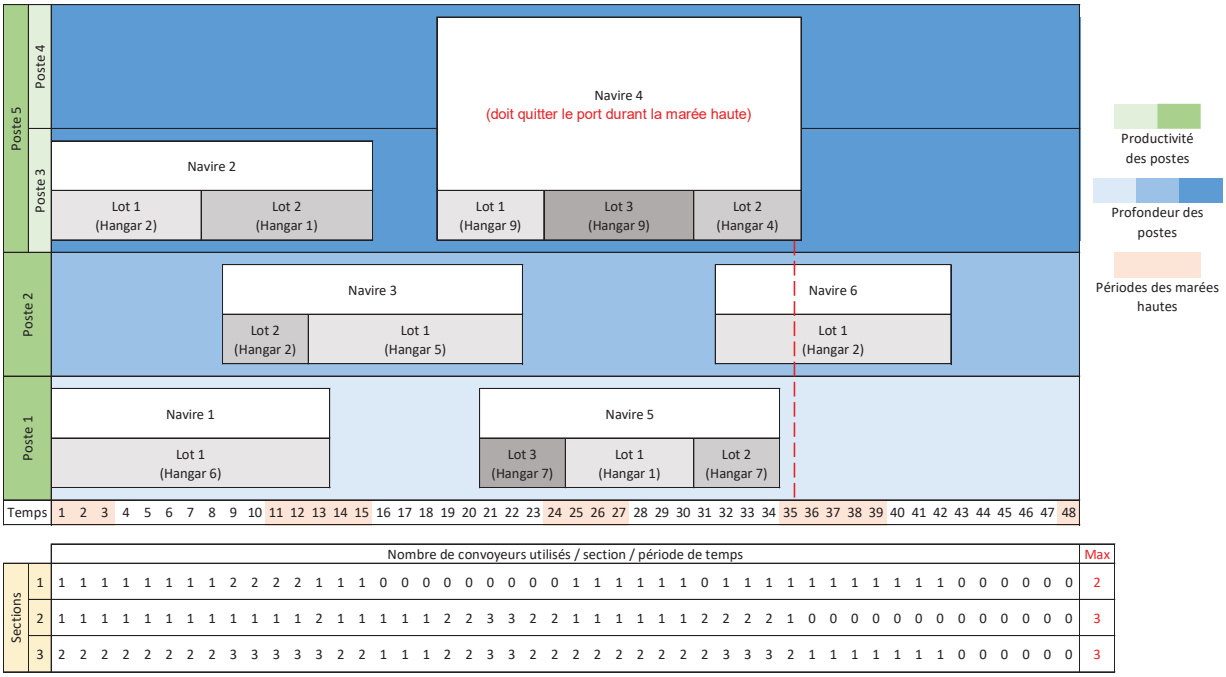


Figure 6 : Exemple de diagramme de Gantt de l'accostage des navires à un quai et du chargement des lots

5.2 Résultats des tests numériques

Pour chaque ensemble d'instances, le tableau 5 donne le nombre d'instances résolues, le nombre d'instances résolues à l'optimum, le temps de calcul moyen en secondes et le gap moyen en pourcentage. Pour chaque instance, le temps de calcul a été limité à une heure et le gap a été calculé comme suit : $100 \cdot (ub - lb) / ub$, où ub est la meilleure borne maximale obtenue durant la limite de temps et lb est la valeur de la fonction-objectif qui correspond à la meilleure solution atteinte en nombre entiers.

N	Instances résolues	Instances résolues à l'optimum	Temps moyen (s)	Gap moyen (%)
20	5	5	55.9	0
30	5	5	72.7	0
40	5	5	979.4	0

Tableau 5 : Résultats des tests numériques

Globalement, depuis les résultats, on observe que le temps de calcul augmente avec le nombre de navires et le solveur peut résoudre à l'optimum toutes les instances.

6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons étudié le problème intégré de l'allocation des planches et des postes à quai dans sa version hybride et dynamique soumis à des contraintes de marées et de convoyeurs dans le contexte des ports vraquiers multiquais dédiés à l'export. Notre étude est motivée par le port de Jorf Lasfar, cependant, elle reste valide pour n'importe quel port vraquier sous réserve de modifications mineures. Un nouveau modèle linéaire en nombres entiers a été proposé pour résoudre ce problème. Sa formulation mathématique est rendue flexible grâce à l'usage massif de prédicats dans la définition du domaine d'existence des variables de décision.

Les tests numériques montrent que le modèle proposé est capable de résoudre des instances de taille réelle, allant jusqu'à 40 navires pour un horizon de planification de 20 jours, en un temps de calcul moyen de moins d'une demi-heure.

Comme perspectives, une extension du modèle est prévue pour intégrer les décisions relatives à l'allocation des hangars de stockage aux décisions l'allocation des planches et des postes à quai en tenant compte des restrictions qui interdisent le stockage de deux types ou de marchandises ou plus dans des emplacements voisins afin d'éviter leur mélange. Enfin, le développement d'un système interactif d'aide à la décision (SIAD) est aussi prévu pour intégrer ces différents problèmes portuaires d'allocation tout en tenant compte des contraintes de l'amont de la chaine logistique. Ce SIAD suivrait une approche combinant l'optimisation et la simulation.

REFERENCES

Barros, V. H., Costa, T. S., Oliveira, A. C. M., and Lorena, L. A. N., 2011. Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints. *Computers & Industrial Engineering*, *60*(4), p. 606–613. https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.12.018

Bouzekri, H., Alpan, G., et Giard, V., 2019a. Modélisation des problèmes de l'allocation des planches et des postes à quai. 13ème Conférence internationale de CIGI QUALITA 2019, Montréal, Canada. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02277658

Bouzekri, H., Alpan, G., and Giard, V., 2019b. Integrated Laycan and Berth Allocation Problem. *2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, Shanghai, China. https://doi.org/10.1109/IESM45758.2019.8948110

Bouzekri, H., Alpan, G., and Giard, V., 2020. Modélisation du problème de l'allocation des planches et des postes à quai dans les ports vraquiers : jeux de données et résultats. *Mendeley Data, V1.* http://dx.doi.org/10.17632/sn4smf5pk9.1

Ernst, A. T., Oğuz, C., Singh, G., and Tehrani, G., 2017. Mathematical models for the berth allocation problem in dry bulk terminals. *Journal of Scheduling*, *20*(5), p. 459–473. https://doi.org/10.1007/s10951-017-0510-8

Lorenzoni, L. L., Ahonen, H., and Alvarenga, A. G. de., 2006. A multi-mode resource-constrained scheduling problem in the context of port operations. *Computers & Industrial Engineering*, *50*(1–2), p. 55–65. https://doi.org/10.1016/j.cie.2005.11.001

Menezes, G. C., Mateus, G. R., and Ravetti, M. G., 2017. A branch and price algorithm to solve the integrated production planning and scheduling in bulk ports. *European Journal of Operational Research*, *258*(3), p. 926–937. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.073

Pratap, S., Nayak, A., Kumar, A., Cheikhrouhou, N., and Tiwari, M. K., 2017. An integrated decision support system for berth and ship unloader allocation in bulk material handling port. *Computers & Industrial Engineering*, *106*, p. 386–399. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.009

Robenek, T., Umang, N., Bierlaire, M., and Ropke, S., 2014. A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports. *European Journal of Operational Research*, *235*(2), p. 399–411. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.015

Umang, N., Bierlaire, M., and Vacca, I., 2013. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *54*, p. 14–31. https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.03.003

UNCTAD. (2019). *Review of Maritime Transport 2019*. United Nations.

Unsal, O. and Oguz, C., 2019. An exact algorithm for integrated planning of operations in dry bulk terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *126*, p. 103–121. https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.018

DIMENSIONNEMENT D'ESPACES DE TRAVAIL INTEGRANT LES SURFACES D'USAGE DES EQUIPEMENTS

Daniela V. CACERES, Remiel FENO

Département Ingénierie des Equipements de Travail
Institut National de Recherche et de Sécurité (1 rue du Morvan, 54519 Vandœuvre-Lès-Nancy Cedex, France)

daniela.villanueva.caceres@gmail.com
remiel.feno@inrs.fr

Amal MTIBAA

Laboratoire de Conception Fabrication Commande
Arts et Métiers Sciences et Technologies (4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz, France)

amal.mtibaa@ensam.eu

RESUME : *Un projet de conception ou d'aménagement de bâtiment industriel inclut généralement une étude d'implantation des espaces et des postes de travail. Le plan d'implantation qui en résulte a un impact important sur l'organisation et les futures conditions de travail. Dans la pratique, les surfaces d'usage nécessaires aux accès et aux circulations des personnes et des moyens de manutention ne sont pas toujours prises en compte ; Cela est d'autant moins évident dans un contexte d'évolution des systèmes de production qui implique une réorganisation de plus en plus fréquente des espaces de travail. Cet article propose une approche de détermination des besoins en surface lié à l'utilisation des équipements de travail. L'objectif est de prévoir l'ensemble des surfaces d'usage afin de réduire les risques liés aux contraintes d'espace (postures contraignantes, effort important) dans les projets de conception ou de réaménagement de locaux. Une analyse comparative de deux méthodes pratiques est présentée, celles dite de "Guerchet" et "0+5+X". Quatre cas d'applications industrielles sont utilisés pour illustrer la démarche.*

MOTS-CLES : *Dimensionnement, espace de travail, implantation, santé et sécurité, conception*

1 INTRODUCTION

Les évolutions associées à l'industrie du futur, notamment en termes de flexibilité et de reconfigurabilité, modifie en profondeur le visage de l'entreprise. Elles suscitent de nouveaux défis notamment la capacité pour ces entreprises de réorganiser rapidement leur moyen de production pour répondre aux exigences fluctuantes des clients tout en prenant en compte des aspects liés à la prévention des risques professionnels (Marsot, 2018) (Martin et al, 2019).

Les besoins de reconfiguration et d'organisation spatiale nécessitent de repenser la manière de concevoir et de dimensionner les espaces de travail en fonction des situations de travail réelles. Cela nécessite souvent de revoir l'implantation des équipements et des postes de travail ainsi que son incidence sur les conditions de travail.

De façon schématique, un projet d'implantation commence généralement par la rédaction d'un cahier des charges contenant les exigences du projet. Une analyse des activités et de leurs interactions est effectuée afin d'identifier les flux et les circulations. Sur la base de cette analyse, les besoins en surface et les relations fonctionnelles sont déterminés. Un schéma fonctionnel peut ainsi être élaboré. Ce dernier servira de base pour élaborer un plan d'implantation général puis détaillé (Tompkins, 2010).

Dans cet article, nous nous attacherons plus particulièrement à l'étape de détermination des besoins en surface. C'est en effet une étape décisive d'un point de vue opérationnel mais aussi en matière de prévention des risques professionnels. Des contraintes d'espace peuvent conduire à des inefficacités organisationnelles mais également à des risques d'accidents ou de maladies professionnels : espace non prévu ou insuffisant pour accéder et circuler aisément aux postes de travail.

La section suivante présente un état de l'art des méthodes dimensionnement existantes et détaille en particulier la méthode de Guerchet et la méthode 0+5+x. Une analyse comparative est proposée pour identifier les limites de ces méthodes dans la prise en compte des exigences d'accessibilité, de circulation et de dimensionnement d'un espace de travail. Un modèle intégré est proposé sur la base de ces deux méthodes. Quatre cas d'applications industriels sont utilisés pour illustrer l'intérêt et les limites de la démarche.

2 ETAT DE L'ART

La norme NF EN ISO 6385 (2016) définit un espace de travail comme « *le volume assigné à une ou plusieurs personnes dans un système de travail pour accomplir la tâche. Autrement dit, l'espace de travail est* ***la surface au sol et la hauteur nécessaire*** *pour le développement des activités de travail* ».

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature dans le but d'estimer les espaces de travail. Selon Muther (2015), ces méthodes peuvent être classées en six familles de méthodes : par calcul, par des dimensions standardisées, par conversion, par projection, avec des tendances

ou ratio et mixtes. Les méthodes mixtes le calcul et l'utilisation de dimensions standardisée. Elles incluent notamment la méthode de Guerchet (Guerchet, 1954), la méthode « 0 + 5 + X Planning model » (Schenk et al. 2010) et celle de Stephens et Meyers (2013).

Cette section développe deux de ces méthodes ; celle de « Guerchet » et la méthode « 0 + 5 + X Planning model ». Elles ont été retenues du fait de leur capacité potentielle à prendre en compte, en plus des surfaces fonctionnelles, des surfaces d'usage indispensables pour la prévention des risques professionnels. De plus, ces 2 méthodes peuvent être utilisées dès la phase d'implantation générale vu que les données d'entrée ne requièrent pas la connaissance détaillée de l'aménagement de l'atelier.

2.1 La méthode de Guerchet

Selon cette méthode, la surface totale d'un espace de travail est la somme de quatre surfaces : Une surface propre au poste de travail **Sp** dite aussi surface statique, une surface de gravitation **Sg**, une surface d'évolution **Se** et une surface de stockage **Sc** (St = Sp + Ss + Sg + Se).

- La surface propre est la surface au sol occupée par un équipement. Elle est donnée par le produit entre sa longueur A et sa largeur L de (Sp=L×A).
- La surface de gravitation correspond à la zone d'accès pour la circulation de l'opérateur au poste de travail. Elle est donnée par le produit de la surface propre Sp et du nombre d'accès au poste **N** (Sg=Sp × N).
- La surface d'évolution est la surface des allées de circulation incluant l'accès des moyens de manutention au poste de travail. Elle est donnée par le produit entre un coefficient d'évolution **K** et la somme des surfaces propre et de gravitation Sg (Se = (Sg + Sp) × K). Ce coefficient d'évolution varie de 0.05 à 3 en fonction de la nature des moyens de manutention et/ou du type d'activité. Il peut en effet être calculé directement en utilisant les formules (1-2-3) soit en se basant sur le tableau 1 en fonction du moyen de manutention ou bien à l'aide du tableau 2 qui est fonction du type d'industrie.
- Enfin, la surface de stockage représente l'espace nécessaire pour stocker la matière première, les encours et les produits finis.

$$K = 0.5 \times \frac{h_{em}}{h_{ef}} \qquad (1)$$

Avec

$$h_{em} = \frac{\sum_{i=1}^{r} Surface_i \times n \times h}{\sum_{i=1}^{r} Surface_i \times n} \qquad (2)$$

h_{em} : hauteur moyenne pondérée des éléments mobiles
r : variété des éléments mobiles/fixe
$Surface_i$: Surface statique de chaque élément
h : hauteur de l'élément mobile
n : nombre des éléments mobiles de chaque type

Et,

$$h_{ef} = \frac{\sum_{i=1}^{t} Surface_i \times n \times h}{\sum_{i=1}^{t} Surface_i \times n} \qquad (3)$$

hef : hauteur moyenne pondérée des éléments fixes
t : variété des éléments fixes
$Surface_i$: Surface statique de chaque élément
h : hauteur de l'élément fixe
n : nombre des éléments fixes de chaque type

Moyen de manutention	Valeur de K
Pont roulant	0.1
Balancelles	0.2
Convoyeurs	0.3 - 0.4
Manutentions manuelles	0.5
Transpalette	0.75 – 1,00
Chariot élévateur	2.00 – 3.00

Tableau 1 : Les valeurs de K en fonction du moyen de manutention (Coniel et al.,2016)

Le type de l'industrie	Valeur de K
Grosses industries	0.05 – 0.15
Convoyeur mécanique	0.1 – 0.25
Fils textiles	0.05 – 0.25
Tissage	0.5 - 1
Horlogerie	0.75 – 1.00
Petite mécanique	1.5 – 2.00
Grosse mécanique	2.00 – 3.00

Tableau 2 : Les valeurs de K en fonction du type de l'industrie (Coniel et al.,2016)

2.2 La Méthode « 0 + 5 + X Planning Model »

Cette méthode est basée sur des études pratiques et plusieurs projets proposant des ratios de surfaces dans une cinquantaine de secteurs d'activités, allant de la fonderie jusqu'à la fabrication de produits électroniques (Schenk et al., 2010). Elle recouvre l'ensemble du processus de la phase de définition du problème jusqu'à la phase de l'implantation et d'exécution du projet.

Cette méthode permet en particulier un dimensionnement détaillé des espaces de travail en faisant la différence entre les surfaces dédiées à la fabrication et à l'assemblage des pièces. Dans le cas des surfaces dédiées à la fabrication, la surface des postes de travail associés à une machine est la somme de la surface de production (A_{PA}) et de la surface d'entreposage (A_{SA}).
Les calculs de la surface de production des pièces (A_{PA}) débutent par la détermination de l'empreinte au sol occupé par la machine (A_{FP}). A cette surface principale, s'ajoute différentes surfaces secondaires détaillées ci-après.

Cette surface A_{PA} peut être calculée, selon différentes méthodes, en fonction du degré requis de précision et de la qualité des informations disponibles. Nous avons retenu la méthode utilisant les « surfaces de substitution » pour sa cohérence avec les critères de prévention pour les accès aux postes de travail. Elle consiste à ajouter une distance de 1 m sur les côtés de la machine nécessitant un accès pour des besoins opérationnels et une distance de 0,4m sur les côtés nécessitant un accès pour des services (cf. figure 1). La surface de production est donnée alors par le produit entre la longueur et la largeur de l'empreinte au sol ainsi corrigée ($A_{PA} = W_{pa} \times D_{pa)}$

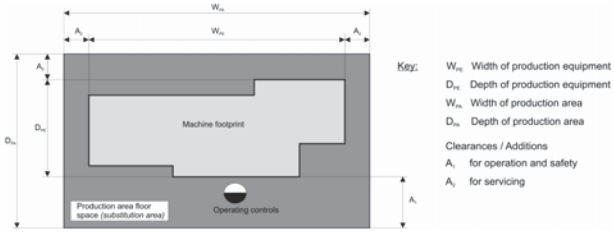


Figure 1 : Surface de substitution

La surface d'entreposage (A_{SA}) est le produit entre la surface de transport (A_{TU}) (palettes par exemple) et le nombre d'unité de transport (N_{TU}).

$$A_{SA} = A_{TU} \times N_{TU} \quad (4).$$

Une fois les surfaces individuelles de chaque équipement de travail calculées, la surface totale de production (A_P) est estimée à partir de la somme des surfaces individuelles et des différentes sous-surfaces :

$$A_p = A_N + A_T + A_I + A_A \quad (5).$$

- A_N représente la surface de production nette qui correspond aux surfaces opérationnelles (production principale, production secondaire, maintenance…)

$$A_N = \sum A_{PA} \times (1 - \eta_{oe}) + A_{un} \quad (6)$$

  - η_{oe} est un facteur de superposition externe donné par l'équation (7)
  - A_{un} est l'espace au sol non exploitable associé à la structure du bâtiment (colonnes, parois...). A_{un} est estimé à environ 10 à 20 % de la somme des A_{PA}

$$\eta_{oe} = 1 - \left(\frac{A_{PAréel}}{A_{PAcalculé}}\right) \times 100\% \quad (7)$$

- A_T est la surface de transport qui correspond aux allées de circulation des personnels et des matériaux $A_T = 0.4 \times \sum A_{PA}$
- A_I est la surface de stockage temporaire (encours de production) $A_I = 0.4 \times \sum A_{PA}$
- A_A est la surface auxiliaire qui correspond aux autres activités : contrôle, management, approvisionnement ou évacuation de déchets $A_A = 0.2 \times \sum A_{PA}$

2.3 Problématique et méthodologie de recherche

L'état de l'art fait ressortir plusieurs interrogations. La méthode de Guerchet ne précise pas la nature exacte de la surface d'évolution ni ses conditions d'applications : intègre t'elle ou non une partie de la voie de circulation qui dessert cet équipement par exemple ? Le coefficient d'évolution K peut être défini selon le type d'industrie ou le moyen de manutention mais pas de critère définir pour donner un ordre de priorité lorsque les 2 sont possibles.
De plus, de nouveaux moyens de manutention liés à l'implantation des systèmes technologiques du futur ne sont pas pris en compte dans la détermination des valeurs de K. Par exemple, l'utilisation de bras manipulateurs ou de robots collaboratifs nécessite de prévoir des espaces de travail « isolés » ou « partagés » :

- Espace de travail coopératif
- Espace contrôlé où l'opérateur est protégé du démarrage et du redémarrage
- Espace de protection
- Espace restreint au robot ou à l'opérateur

Concernant la méthode « 0 + 5 + X Planning model » les dimensions standardisées doivent être vérifiées vis à vis des exigences de prévention des risques. Elle ne prend pas en compte le type de moyen de manutention utilisé.

Un espace de travail dont les dimensions ne sont pas adaptées aux activités de travail et de manutention a une incidence directe sur l'organisation et les conditions de travail. Cela se traduit par des contraintes d'espace dans la phase opérationnelle. Ce sont les opérateurs qui devront palier ces manques en travaillant en dehors des conditions idéales d'intervention en terme de posture ou d'effort.

Afin de proposer une méthode de dimensionnement intégrant les critères de santé et sécurité, nous proposons de tenir compte des points forts et des limites des deux méthodes identifiées.

Dans les sections suivantes, ces deux méthodes seront appliquées à quatre cas d'études. Les surfaces obtenues par ces méthodes seront comparées et confrontées d'une part aux dimensions mesurées sur le terrain et d'autre part, aux exigences de prévention : largeurs d'accès minimum, distances de sécurité.

3 CAS D'ETUDES

Quatre cas d'étude avec différents niveaux d'analyse ont été retenus pour tester ces méthodes. Les deux premiers sont issus du logiciel d'implantation d'atelier Impact (Qlio Transfert) et ils couvrent chacun un atelier complet. Les deux autres ont spécifiquement été développés pour cette étude. Ils couvrent respectivement un poste de travail et une zone de production.

Cas d'étude 1
Il s'agit d'un atelier de production pour un sous-traitant aéronautique qui fabrique des pièces par usinage. L'atelier est composé de 4 secteurs de production et comprend 14 machines en total. Les pièces sont transférées par transpalette au sein de l'atelier.

Cas d'étude 2
Il s'agit également d'un atelier de production qui produits et assemble des pièces mécaniques à partir de pièces détachées. L'atelier comprend 13 machines et une zone de stockage de matière première et de produits finis.

Cas d'étude 3
Il s'agit d'un poste de préparation de toit de véhicule qui fournit une ligne de montage automobile. Le poste de travail comprend un manipulateur mécanisé qui aide l'opérateur à prélever des toits dans 4 conteneurs différents et les placer sur une table de préparation tournante. Le principal enjeu pour le dimensionnement de ce poste de travail concerne la prise en compte de l'espace nécessaire pour le déplacement du manipulateur et de l'opérateur.

Cas d'étude 4
Il s'agit d'une zone de production qui produit des bancs d'essai spécifiques à des fins de recherche. La taille des pièces à fabriquer peut varier de très petite à très grande. Les flux de matériaux sont faibles en raison de l'activité de type production unitaire.

3.1 Relevé des mesures de surface

Le tableau 3 présente les surfaces mesurées pour les quatre cas d'étude. On note E: Equipement, S: Stock, A: Accès, C: Circulation.

Cas d'étude	E	S	A	Prod	C	Total
Cas 1	40.2	21	110.3	171.5	66	237.6
Cas 2	46.6	19.2	162.9	228.2	100.6	328.9
Cas 3	3.1	12.8	29.4	45.3	38.6	83.9
Cas 4	55	0.3	54.9	110.2	37.7	147.9

Tableau 3. Surfaces mesurées (m²)

Afin d'avoir des surfaces de références adaptées aux activités, ces surfaces mesurées ont été confrontées aux critères de prévention des risques pour aboutir à des surfaces dites « modifiées » (cf. tableau 4). Pour les cas 1 et 2, la profondeur des surfaces de gravitation a été fixée à 1 m minimum pour les interventions de production et à 0, 6m pour interventions occasionnelles, la distance entre les machines a été ramenée à 0,8m minimum. Les voies de circulations ont été modifiées en tenant compte des largeurs recommandées pour le moyen de manutention utilisé (2 × Larg. transpalette + 1.4m).

Cas d'étude	Prod	C	Total
Cas 1	173	89.3	262.7
Cas 2	230	114.6	344.6
Cas 3	45.3	38.6	83.9
Cas 4	110.2	37.7	147.9

Tableau 4. Surfaces corrigée (m²)

3.2 Comparaison des surfaces mesurées et estimées

L'objectif de cette analyse est de comparer, les surfaces mesurées sur le terrain, et celles corrigées en tenant compte des critères de prévention, avec les résultats des méthodes « Guerchet » et « 0 + 5 + X Planning model ».

3.2.1 Méthode de Guerchet
Plusieurs autres interrogations se sont posées suite à l'application de la méthode de Guerchet aux 4 cas d'étude.

- Les équipements secondaires sont-ils compris dans la surface propre ? Ou dans la surface de stockage ?
Après les avoir pris en compte en tant qu'équipements puis en tant que stock, nous avons conclu que les équipements secondaires doivent être compris dans le calcul de la surface propre afin d'éviter de sous dimensionner le poste de travail.

- Le nombre d'accès (N) est-il exclusivement lié opérations principales ou également aux autres activités telles que la maintenance et le nettoyage ?
La figure 2 rassemble l'estimation des surfaces pour l'ensemble des machines appartenant aux 4 cas d'étude. La taille des bulles permet d'apprécier en fonction de la surface propre de l'équipement et du nombre d'accès, l'écart entre la surface de gravitation calculée par cette méthode et la surface de référence (cf. tableau 4)

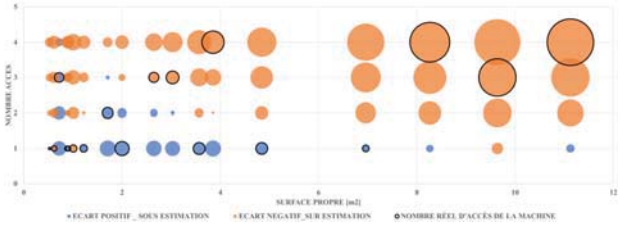


Figure 2 : Ecart d'estimation des accès selon la méthode de Guerchet

Les principaux constats issus de cette analyse sont :
- Plus la surface propre est importante, ou plus il y a d'accès, plus la surface de gravitation est surdimensionnée.
- Pour les machines de petite taille (surface propre inférieure à 4 m² environ), le nombre d'accès qui permet de dimensionner au plus juste serait de 2.
- Pour les machines de grande taille (surface propre supérieure à 4 m² environ), le nombre d'accès qui permet de dimensionner au plus juste est égal à 1.

- La valeur du coefficient K permettant de définir la surface d'évolution est-elle pertinente ?
Le tableau 5 rassemble les valeurs possibles pour le coefficient K selon que l'on utilise les formules (1-2-3) ou le tableau de valeurs standardisées en fonction des moyens de manutention (Tableau 1). Inversement, le rapport entre la surface Sp+Sg calculée et la surface mesurée modifiée permet de déduire une valeur de K souhaitée.

Cas d'étude	K formule	K tableau des ratios standardisés	K déduit Surface réelle modifiée
Cas 1	0.6	0.9	0.8
Cas 2	0.9	0.9	1.4
Cas 3	0.8	-	3.6
Cas 4	0.4	0.5	0.0

Tableau 5. Valeurs possibles du coefficient K

On constate que les valeurs du coefficient K selon le tableau de valeurs standardisées ne permettent pas de tenir compte des cas où la taille de la pièce est importante comme dans le cas d'étude 3, ainsi que la diversité des moyens de manutention actuellement utilisés en industrie.

De même, les valeurs de K données par les équations 1-2-3 est également éloignée de la réalité (K déduit). La hauteur du moyen de manutention a peu d'impact sur la surface d'évolution. L'aspect qui paraît plus déterminant est la hauteur de manutention des produits. Un déplacement des produits en hauteur à l'aide d'un pont roulant ou d'une balancelle nécessitera moins de surface au sol du fait de la possibilité de passer au-dessus d'autres équipements.

3.2.2 Méthode « 0+5+X Planning model »

La mise en pratique de cette méthode a soulevé de nombreuses questions, notamment sur le calcul de la surface des accès, des stocks et des allées de circulation.

- Comment calculer la surface pour les accès ? Est-elle adaptée aux activités des opérateurs ?
Un léger sous-dimensionnement de cette surface a été constaté, qui augmente au fur et à mesure que le nombre d'accès augmente. Pour certaines machines, cette méthode a montré un écart égal à zéro entre la surface calculée et la surface réelle. Elle propose en effet une approche pour le calcul des surfaces d'accès selon leur nature ce qui est proche des préconisations de prévention.

- Comment dimensionner la surface de stockage?
La méthode « 0+5+X Planning model » propose deux manières différentes de calculer les surfaces de stockage :

- Un calcul individuel des surfaces de stockage à partir des surfaces (ATU) et du nombre (NTU) des unités de stockages déclarées (cf. équation 4).
- En majorant de 40% de la surface nette de production ($0{,}4 \times A_N$).

Il n'est toutefois pas précisé à quel type de stock ces surfaces correspondent ni laquelle de ces deux méthodes devraient s'appliquer pour les calculer.
Les résultats les plus proches des surfaces mesurées ont été obtenus en les combinant : calcul des surfaces de stockage avec les données connues selon (4) puis majoration de 40% de la somme des surfaces de production (A_N).

- Le calcul de la surface des allées de circulation est-elle adaptée aux activités des opérateurs ?
La méthode « 0+5+X Plannig model » propose d'ajouter 40% de la surface nette (A_N) pour les surfaces dédiées au transport et 20% pour une surface additionnelle (déchets, management, contrôle qualité...).
Cette approche ne semble pas la plus adaptée pour le calcul de la surface dédiée à la circulation, pour les deux raisons suivantes :

- Le moyen de manutention qui est un facteur déterminant pour le calcul de la surface de circulation n'est pas pris en compte.
- Elle ne distingue pas les surfaces liées aux voies de circulation secondaires (circulation interne à un secteur) ni les allées principales sachant que les moyens de manutentions peuvent être différents dans les 2 cas.

3.2.3 Comparaison des deux méthodes

La figure 3 présente la comparaison entre les surfaces estimées avec les deux méthodes et les surfaces réelles modifiées. Le calcul de la surface d'évolution par Guerchet a été réalisé avec un coefficient K issu des formules 1-2-3.

La figure 4 à son tour, montre la comparaison entre les surfaces estimées avec les deux méthodes et la surface totale mesurée (surface de production + surface des voies de circulation).

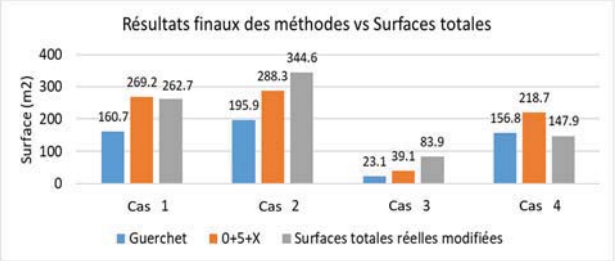


Figure 3 Surfaces de production réelles et estimées

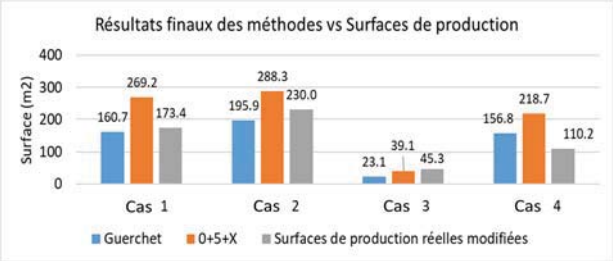


Figure 4 Surfaces totales mesurées et estimées

Les principaux constats sont les suivants :

- La méthode de Guerchet permet d'estimer de façon plus précise que la méthode « 0+5+X Planning model » la surface de production. Ce constat permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle les allées de circulations principales ne sont pas prises en compte dans le calcul de la surface d'évolution,
- La méthode « 0+5+X Planning model », au contraire, a permis de trouver une surface totale plus proche de la réalité que la méthode de Guerchet.

La principale différence entre ces deux méthodes se trouvent dans le calcul des surfaces d'accès et de stockage. D'une part, les surfaces d'accès calculées par la méthode de Guerchet sont souvent inférieures à celles calculées par la méthode « 0+5+X Planning model » qui, comme nous l'avons vu, se rapprochent des surfaces mesurées.
D'autre part, la méthode « 0+5+X Planning model » aboutit à des surfaces de stockage plus importantes que la méthode de Guerchet du fait de la prise en compte de surfaces de stockage additionnelles.

4 DEMARCHE PROPOSEE (DIMESTRA)

Sur la base de l'analyse comparative précédente, un modèle intégré issu des deux méthodes est proposé pour le dimensionnement d'un espace de travail. Les accès sont estimés en adaptant l'approche de la méthode « 0+5+X Planning model » et les espaces d'évolution, en adaptant le facteur K de la méthode de Guerchet.

- Surface pour les équipements (Sp) : la totalité des équipements sont pris en compte (primaires et secondaires). Comme le propose les deux méthodes, cette surface inclut la surface au sol de l'équipement projeté dans toutes ses positions de travail. Elle prend en compte les débattements maximaux de la machine et les dépassements éventuels de pièces.

- Surface pour le stock (Ss) : Cette surface inclut les stocks de matières premières, des produits en cours et des produits finis. Cette surface est calculée en deux étapes. Tout d'abord, le stock au poste de travail donné par le produit entre le nombre de moyens de manutention et la surface du moyen de manutention. Ensuite, une surface additionnelle pour le stock commun entre les différents postes de travail est calculée. C'est ce qu'on a appelé un stock temporaire dans le cas de la méthode « 0+5+X Planning model » (voir section 2.2). Il représente un pourcentage de la somme des surfaces de production individuelle ($\sum A_{PA}$). Ce pourcentage est estimé empiriquement en fonction du secteur d'activité. Par exemple dans le secteur de la construction de machines, il est estimé à 40%.

- Surface pour les déchets (Sd) : cette surface n'est pas prise en compte par la méthode de Guerchet. La méthode « 0+5+X Planning model » prend en compte cette surface dans le calcul de la surface auxiliaire (20% de la somme des surfaces individuelles). Néanmoins, la surface pour les déchets devrait être dimensionnée en fonction du type d'activité, du type de machines, des matériaux de fabrication, de la cadence de production...

- Surface pour les accès (Sa) : La méthode « 0+5+X Planning model » permet de calculer la surface dédiée aux accès selon leur nature. Elle propose d'ajouter une surface équivalente à la longueur du côté de l'accès par une profondeur de 1 m pour les opérations et de 0,4 m pour les services. Cette particularité permet d'intégrer facilement des critères de prévention à travers les distances de sécurité préconisées dans les normes. Nous proposons ainsi de nouvelles dimensions à ajouter à chaque côté d'accès, afin de prendre en compte les préconisations de sécurité :

a) Accès aux équipements
- 1 m en profondeur pour les côtés ou des accès liés à des activités de production sont prévus.
- 0,6 m en profondeur pour les côtés ou des accès liés à des interventions occasionnelles sont prévus.
- 0,4 m en profondeur pour les côtés de façon à laisser au minimum 0,8 m libres entre 2 machines.
- 1,5 m si l'activité à réaliser implique une position agenouillée au lieu des 1m pour un accès principal ou 0,80 pour un accès occasionnel.
- 0,5 m en plus pour les accès aux équipements ayant des portes ou des tiroirs afin de tenir compte de leur débattement (ED 6122, 2018).

b) Accès aux unités de stockage

Il est conseillé de laisser un accès de 0,5 m entre palettes et conteneurs. Nous proposons donc de prévoir un accès d'une profondeur de 0,25 m de chaque côté de l'unité de manutention.

c) Un dégagement minimal de 500 mm est à prévoir entre l'espace opérationnel et les zones du bâtiment, des structures, d'autres machines ou des moyens d'accès pouvant créer un coincement (NF EN ISO 10218-2)

- Surface d'évolution ou des allées de circulation secondaires (Sas) : Les moyens de manutention utilisés au sein du secteur de production et ceux utilisés entre secteurs ne sont pas toujours les mêmes. Il serait souhaitable, dans ce cas, de dimensionner la surface d'évolution et les allées de circulation principales en deux étapes distinctes. Comme nous l'avons vu, le coefficient d'évolution K proposé par la méthode Guerchet sert à calculer une surface d'évolution approximative, néanmoins pas assez précise. Nous proposons donc de conserver cette approche à condition d'apporter des modifications dans la détermination et dans la manière d'intégrer ce coefficient K dans le calcul de la surface Sas.

Les paramètres qui ont une corrélation directe avec la surface d'évolution et qui devraient être pris en compte pour définir la valeur du coefficient K sont :
- Surface et nombre dd moyens de manutention
- Nombre d'opérateurs
- Nombre d'accès et les dimensions de la machine
- Taille des pièces
- Flux de matière

Inversement, K devrait également prendre en compte le rapport entre d'une part la hauteur des machines et des opérateurs et d'autre part, la hauteur à laquelle le moyen de manutention transporte la pièce. Ce rapport a en effet une corrélation inverse avec la surface d'évolution car il permet de passer au-dessus des machines pour le transport des produits

Les modifications suivantes sont également proposées :
- La valeur K est appliquée sur **la surface des accès opérationnels des équipements primaires** et non sur la surface propre plus la surface de gravitation.
- La valeur de K sera supérieure à 1 lorsque la manutention d'une pièce, du fait de sa taille ou de celle du moyen de manutention, dépasse les dimensions de l'accès opérationnel
- Dans les autres situations, l'accès ne sera pas majoré (K = 1).

- Surface des allées de circulation principales (Sap) : l'estimation de cette surface constitue l'une des principales difficultés pour le dimensionnement. Plusieurs auteurs proposent des pourcentages pour dimensionner les allées. Muther (1970) conseille de multiplier par un facteur allant de 1,3 à 1,8, tandis que Stephens et Meyers (2013) proposent un facteur allant de 1,5 à 2. Le tableau 6 montre les facteurs nécessaires pour trouver la surface réelle modifiée dans chaque cas d'étude.

Cas d'étude	Surf. Prod. modifiée	Surf. Prod. + Allées	% à majorer
Cas 1	173.4	262.7	1.5
Cas 2	230.0	344.6	1.5
Cas 3	45.3	83.9	1.9
Cas 4	110.2	147.9	1.3

Tableau 6. Estimation des allées de circulation (m²)

Comme nous pouvons le constater, les pourcentages pour les cas d'études réalisés se trouvent dans un intervalle allant de 1,3 à 1,9. Ces facteurs sont ainsi compris dans la fourchette proposée par les différents auteurs.

Vu que la configuration des secteurs n'est généralement pas connue lors de la phase d'implantation générale, nous proposons d'utiliser un facteur compris entre 1,3 et 2 qui permet de pré-dimensionner au mieux la surface S_{AP}. Il convient de faire définir ce facteur sur la base des ateliers semblables (même industrie, même types de machines ou des processus…).

5 CONCLUSIONS

La démarche de prévention des risques professionnels est toujours plus efficace et plus économique lorsqu'elle est intégrée dès la phase de conception. Dans cette optique, il est souhaitable de dimensionner les espaces de travail au plus tôt dans le projet en incorporant des critères de prévention, afin de prévoir un espace suffisant pour le bon déroulement des activités.

Nous avons étudié deux méthodes de dimensionnement: les méthodes de Guerchet et « 0+5+X Planning model ». Ces méthodes ont été ensuite appliquées sur les données issues de 4 cas d'étude industriels, afin de comprendre leurs subtilités et leur fonctionnement qui ne sont pas nécessairement détaillés dans la littérature. De cette manière il a été possible d'étudier leur potentiel et leurs limites pour dimensionner des espaces adaptés aux activités.

La méthode de Guerchet ne permet pas contrairement à la méthode « 0+5+X Planning model » de dimensionner correctement la surface pour les accès aux équipements. En ce qui concerne les surfaces d'évolution des moyens de manutention les deux méthodes présentent des limites. Si le principe du facteur K proposé par la méthode de Guerchet est intéressant, sa définition et son domaine d'application ont été revus pour être plus proche de la réalité. La méthode « 0+5+X Planning model » ne permet pas de faire la distinction entre la surface d'évolution et les allées de circulation principales.

Un modèle intégré qui met à profit les avantages des 2 méthodes a été ainsi proposé. Des propositions pour résoudre les limitations repérées sont également exposées, notamment l'adjonction d'une surface pour les déchets, la prise en compte des distances de sécurité pour le calcul des accès et l'ajustement de la valeur K pour le dimensionnement de la surface d'évolution.

En perspective, une étude focalisée sur la valeur K devra être réalisée pour améliorer l'estimation des surfaces d'évolution (ou circulations secondaires), vérifier les ratios standardisés de K et d'intégrer les nouveaux types de moyens de manutentions non pris en compte actuellement (ex : bras manipulateurs, robots collaboratifs).

REFERENCES

Coniel, F. et Quenea, M., 2016. Méthode de Guerchet. Étude d'un poste de travail. Pairform.

Guerchet, P. 1954. "Calcul Des Surfaces d'implantation." Revue Travail et Méthodes, 43–47.

Marsot, J. 2018. "L'industrie Du Futur : De Quoi Parle-t-On ?" Hygiène et Sécurité Au Travail. Décryptage N°235.

Martin P., Daille-Lefevre b., Siadat A., Marsot J., Godot X., Lux A., Etienne A., Abba G., Dantan J.Y. 2019. "Les Nouveaux Challenges de Santé - Sécurité Au Sein de l'usine Du Futur." CIGI QUALITA. Montréal, Québec.

Muther, R., 1970. Distribución en planta. Espagne: McGraw Hill Book Company.

Muther, R. et Hales, L., 2015. Systematic Layout Planning. États-Unis 4è édition : Management & Industrial Research Publications.

NF EN ISO 6385. 2016. "Principes Ergonomiques de La Conception Des Systèmes de Travail." Paris: AFNOR.

NF EN ISO 14122-2. 2017. "Sécurité Des Machines — Moyens d'accès Permanents Aux Machines — Partie 2 : Plates-Formes de Travail et Passerelles." Paris: AFNOR.

NF EN ISO 10218-2. 2011. « Exigences de sécurité pour les robots industriels – Partie : Systèmes robots et intégration » Paris : AFNOR.

QLIO Transfert Annecy. "IMPACT : Logiciel d'implantation d'atelier." http://qlio-annecy-transfert.com/logiciel/impact/.

Schenk, M., Wirth, S. et Müller, E., 2010. Factory Planning Manual. Londres: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Stephens, M. et Meyers, F., 2013. Manufacturing Facilities: Design and Material Handling. West Lafayette, Indiana: Purdue University Press.

Tompkins, J., White, J., Bozer, Y. et Tanchoco, J., 2010. Facilities Planning. États-Unis : Wiley-Blackwell

Valdez, L., Castro, N., Nacerau, D., Solano, W. et Vega, I., 2015. Análisis comparativo para la determinación de superficies teórica y real, a través del método Guerchet. Revista de Investigación, Tecnología y Liderazgo Mexicano, 3 (2015), 78-92.

INRS, 2018. Sécurité des équipements de travail. Prévention des risques mécaniques. ED 6122

DE LA SIMULATION A EVENEMENT DISCRET AU MACHINE LEARNING POUR LA CHAINE LOGISTIQUE

Rachid BENMOUSSA

ENSA Marrakech, Université Cadi Ayyad, benmoussa.ensa@gmail.com

RESUME : *Cette article cherche essentiellement à découvrir si le Machine Learning (ML) peut mieux résoudre les problèmes d'aide à la décision de la Supply Chain (SC) par rapport à la simulation à événement discret. Il propose ainsi une étude comparative basée sur l'analyse des convergences, des divergences ainsi que des complémentarités des deux approches. Il s'appuie enfin sur un cas académique pour illustrer les différents propos issus de cette comparaison. Plusieurs résultats découlent de cette étude. Tout d'abord, le ML ne peut pas traiter tous les problèmes d'aide à la décision dans le contexte de la SC. Ensuite, dans le cas ou le modèle est connu, les deux approches sont exploitables toutes les deux avec des avantages et des inconvénients, mais elles sont également complémentaires. Enfin, dans le cas ou le modèle est inconnu, on ne peut avoir recours à la simulation, le ML reste alors l'unique solution.*

MOTS CLES : *Techniques d'apprentissage automatique, Simulation des systèmes, Chaines logistiques, Aide à la décision*

1. INTRODUCTION

Généralement, les chaînes logistiques (SC) opèrent dans un contexte de plus en plus complexe. En effet, les managers de la SC sont constamment sollicités pour gérer différentes contraintes, parfois conflictuelles en raison de l'ouverture des marchés, de la concurrence croissante, de la diversité des produits, des coûts clients, de la qualité, des délais, et des nouvelles exigences environnementales et sociales. Pour surmonter ces contraintes, les chercheurs ont constamment mis à disposition à ces managers des outils d'aide à la décision

La simulation à évènement discret est l'un des outils classiquement utilisé pour l'aide à la décision dans le contexte de la supply chain. La simulation à événements discrets [1] est le processus consistant à décrire le comportement d'un système complexe comme une série d'événements bien définis et ordonnés et fonctionne bien dans pratiquement tous les processus où il y a de la variabilité, des ressources contraignantes ou limitées ou des interactions de système complexes. Elle permet d'évaluer les alternatives potentielles pour déterminer la meilleure approche pour optimiser les performances d'un système ; Comprendre les performances du système en fonction de paramètres clés tels que les coûts, le débit, les temps de cycle, l'utilisation de l'équipement et la disponibilité des ressources ; Réduire les risques grâce à des tests rigoureux des changements sur les processus avant d'engager des dépenses réelles en capital ou en ressources importantes ; Déterminez l'impact de l'incertitude et de la variabilité des paramètres clés sur les performances du système et évaluer les modifications proposées sur les processus, …

Le machine Learning (ML) [2, 3, 4] est une technique émergente qui est de plus en plus utilisé dans tous les domaines et voit son introduction récemment dans le contexte de la supply chain à travers l'avènement du paradigme de l'industrie 4.0. Issue de l'intelligence artificielle, elle se fonde sur des approches mathématiques et statistiques pour donner aux ordinateurs la capacité d' « apprendre » à partir de données, c'est-à-dire d'améliorer leurs performances à résoudre des tâches sans être explicitement programmés pour chacune. Comme pour toutes les autres disciplines, le ML a également impacté le domaine de la SC en tant qu'outil d'aide à la décision. Plusieurs auteurs ont adressé en effet le concept d'économie digital et son application à la smart supply chain [5, 6, 7]. Sans être exhaustif, le ML a été appliqué à différentes facettes de la SC tels que l'automatisation de la SC [8], la Prévision de la demande et la gestion des approvisionnements [9, 10, 11, 12], la sélection des fournisseurs [13, 14, 15], la gestion des risques liés à la SC [16], … Tout expert dans le domaine de la SC peut se poser alors les questions légitimes suivantes. Est ce que le ML peut répondre à tous les problèmes d'aide à la décision de la SC ? Qu'apporte de plus le ML par rapport aux outils classiques de prise de décision en particulier la simulation à événement discret ? est ce que le ML et la simulation sont similaires, contradictoires, complémentaires dans le contexte de la SC ?

L'analyse bibliographique qui a été conduite a permis de détecter certains travaux qui couple la simulation en général au ML [15, 17]. Cependant, elle n'a pas permis de répondre complétement à ces questions. Par contre, [18] assume qu'auparavant, il a été déclaré que la simulation et l'apprentissage automatique étaient presque opposés dans leurs logiques en termes d'entrées et du modèle. Avec la simulation, les entrées de variables

aléatoires ne sont pas connues exactement, mais le modèle est souvent connu exactement. Avec l'apprentissage automatique, les entrées sont connues exactement, mais le modèle est inconnu avant l'apprentissage. En ce qui concerne la sortie, les différences sont plus subtiles. Les deux donnent une sortie, mais la source d'incertitude est différente. En simulation, la principale source d'incertitude réside dans les entrées. Nous devons simuler à plusieurs reprises pour obtenir une gamme de résultats possibles et faire des déclarations sur les probabilités de résultat. Dans l'apprentissage automatique, la principale source d'incertitude réside dans le modèle. Lors d'une prédiction, le modèle n'est souvent pas certain à 100% de la prédiction.

En définitive, l'analyse bibliographique n'a pas permis de trouver des travaux de recherche qui ont comparé l'utilisation de la simulation à évènement discret et le ML dans le contexte de la Supply Chain. Ce papier cherche dans ce sens à réaliser une étude qualitative pour contrecarrer cette lacune. Pour ce faire, nous avons identifié les processus de conduite des projets de simulation et du ML. Nous avons ensuite comparé les étapes des deux processus pour ressortir les convergences et les divergences des deux approches. Nous avons également analysé la complémentarité des deux approches dans le contexte de la supply chain pour l'organisation sur stock et à la commande. Nous avons enfin introduit une étude de cas académique pour illustrer l'utilisation du ML en SC.

2. DEVELLOPEMENT DE L'ETUDE

2.1. Conduite d'un projet de simulation

Un projet de simulation se déroule selon plusieurs étapes décrites dans ce qui suit [1].

2.1.1. Spécification du problème

Cette étape consiste à définir le problème pour lequel nous souhaitons réaliser un projet de simulation afin de réaliser des prédictions. Il s'agit globalement de prédire un ou plusieurs paramètres d'évaluation en fonction d'un ensemble de paramètres d'action.

2.1.2. Analyse de l'existant

Cette étape comporte deux sous étapes :

- **La modélisation conceptuelle :** Consiste à identifier les règles de fonctionnement du processus concerné par le projet de simulation et de le modéliser en utilisant des formalismes formels tels que UML, BPMN, les modèles de traitement de Merise, …
- **La collecte des données :** Consiste à compléter les règles de fonctionnement précédentes par les données nécessaires à la simulation. Cela nécessite la collecte des données réelles par la mesure ou l'observation et la traduction en données au format utilisé par le simulateur, généralement des lois de probabilités. Plusieurs outils informatisés pour le traitement statistique des données sont disponibles pour supporter l'analyste à réaliser cette collecte.

2.1.3. Validation du modèle conceptuel

Cette étape est critique car avoir une modélisation conceptuelle du problème erroné conduirai impérativement à des solutions erronées. La validation se fait par des tests rigoureux de comparaison entre le réel perçu sur le terrain et celui modélisé. Pour plus d'objectivité, il est souhaitable que les testeurs ne soient pas ceux qui ont réalisé la modélisation.

2.1.4. Programmation du simulateur

Cette étape consiste à traduire le modèle réalisé dans la phase précédente en programme de simulation. La connaissance parfaite des fonctionnalités du simulateur est nécessaire. Plusieurs simulateurs à évènement discrets existent dans le marché. Nous citons à titre d'exemple ARENA, Simul8, Witness, …

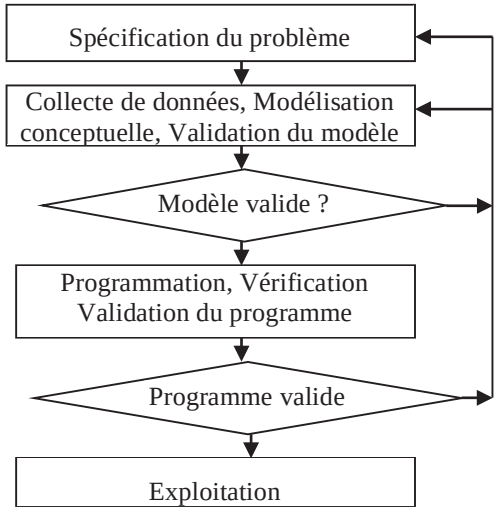
2.1.5. Validation du programme

Cette étape est également critique car avoir un programme de simulation erroné conduirait impérativement à des prédictions erronées. Pour réaliser cette validation, il faut choisir un scénario de déroulement du processus pour lequel nous connaissons ou nous pouvons obtenir des résultats réels sur le terrain. On simule alors ce scenario et on vérifie l'adéquation du résultat de simulation avec les résultats réels.

2.1.6. Exploitation

Une fois le programme valide, on définit l'ensemble des expérimentations à réaliser afin de résoudre le problème identifié dans l'étape 1. A ce stade, le nombre d'expérimentions n'est plus critique car la simulation ne coûte plus rien. La réalisation effective des expérimentations permet de ressortir le scénario qui résout le problème identifié.

Figure 1 : déroulement d'un projet de simulation



2.2. Conduite d'un projet Machine Learning

Le Machine Learning, ou encore l'apprentissage automatique en français, fait partie de l'une des approches de l'intelligence artificielle. Le Machine Learning est donc une discipline scientifique centrée sur le développement, l'analyse et l'implémentation de méthodes automatisables, qui offrent la possibilité à une machine d'évoluer grâce à un processus d'apprentissage, afin d'accomplir des tâches qui auraient été difficiles, voire impossibles, de réaliser avec des algorithmiques plus classiques. Un projet machine Learning peut ne pas être linéaire, mais il possède un certain nombre d'étapes bien identifiées [2, 3, 4].

2.2.1. Définir le problème.

Cette étape consiste à fixer les objectifs de prédiction du machine Learning. Comme l'acquisition de données est une étape importante car l'algorithme se nourrit des données en entrée, il en va de la réussite du projet, de récolter des données pertinentes et en quantité suffisante en fonction du type d'apprentissage souhaité. En effet, le machine Learning comporte plusieurs types d'apprentissage largement décrit dans la littérature [2, 3, 4] : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé, l'apprentissage semi-supervisé et l'apprentissage par renforcement.

2.2.2. La préparation et le nettoyage de la donnée :

Les données recueillies doivent être retouchées avant utilisation. En effet, certains attributs sont inutiles, d'autre doivent être modifiés afin d'être compris par l'algorithme, et certains éléments sont inutilisables car leurs données sont incomplètes. Plusieurs techniques telles que la visualisation de données, la transformation de données ou encore la normalisation sont alors employées.

2.2.3. La création du modèle

Cette étape consiste à trouver le modèle de prédiction le plus précis vis à vis des données, d'apprentissage en entrainant plusieurs algorithmes sur ces données. A ce niveau, on distingue trois grandes typologies d'algorithmes : la Régression, la Classification, et le Clustering. [2,3,4] récapitulent quelques uns des algorithmes de ML les plus couramment utilisés.

2.2.4. Evaluation de l'Algorithme

Une fois l'algorithme d'apprentissage automatique entraîné sur un premier jeu de donnée, on l'évalue sur un deuxième ensemble de données afin de vérifier que le modèle ne fasse pas de sur-apprentissage.

2.2.5. Prédiction

Le modèle est déployé en production pour faire des prédictions, et potentiellement utiliser les nouvelles données en entrée pour se ré-entraîner et être amélioré.

2.3. Convergence vs divergence des deux approches

L'analyse de déroulement des projets de simulation et de machine Learning a permis de dégager les convergences et les divergences des deux approches. Le tableau suivant synthétise ce résultat. Il met en relation les étapes qui sont communes aux deux approches. La colonne observation présente les similitudes et différences des deux approches dans la même étape.

Tableau 01 : convergence / divergence de la simulation et du ML

Simulation à évènement discret	***Machine Learning***	***Observation***
Spécification du problème	Définir le problème	La simulation gère un type de problème unique basé sur la compréhension des règles de fonctionnement du système et qui peut s'assimiler à l'apprentissage supervisé régression du ML. Le machine Learning peut appréhender plusieurs types de problème spécifié par la nature d'apprentissage : supervisé, non supervisé, semi-supervisé, par renforcement.
Modélisation conceptuelle	-	Le machine Learning ne cherche pas à modéliser les règles de fonctionnement du système contrairement à la simulation.
Collecte des données	La préparation et le nettoyage de la donnée	Cette étape est similaire dans les deux approches. Chaque approche utilise des outils spécifiques. Le ML a besoin d'une quantité de données de loin supérieur à celle nécessaire par la simulation.
Validation du modèle conceptuel	-	Le machine Learning ne cherche pas à modéliser les règles de fonctionnement du système contrairement à la simulation.
Programmation du simulateur	La création du modèle	La simulation objet de cette étude utilise un processus à évènements discrets. Le machine Learning utilise plusieurs algorithmes en fonction de la nature

		d'apprentissage
Validation du programme	Evaluation de l'Algorithme	Les deux approches utilisent des données de test non utilisé dans l'étape de développement du modèle.
Exploitation	Prédiction	Les deux approches permettent la prédiction. La simulation permet la prédiction similaire à celle de l'apprentissage supervisé par régression. Elle ne permet pas les autres apprentissages.

2.4. Complémentarité des deux approches

En général, on distingue deux grands types d'organisation des systèmes logistiques : Organisation sur stock et Organisation à la commande.

Dans une organisation sur stock, les articles sont approvisionnés de chez les fournisseurs puis stocker en attendant de les expédier aux clients à la demande. Le stock crée dans ce cas un découplage entre le processus d'approvisionnement de chez les fournisseurs et le processus d'expédition aux clients. De ce fait, les deux processus sont découplés analytiquement, c.à.d. un approvisionnement donné n'impacte pas directement une expédition précise. Ils sont néanmoins couplés indirectement, c.à.d. que l'ensemble des approvisionnements impactent sans aucun doute la performance des expéditions. La simulation répond très bien à ce genre de problèmes car la collecte de données consiste à considérer chaque maillon isolement afin de ressortir ses caractéristiques et cerner son fonctionnement sans chercher à les lier à une étiquette donnée. Ces caractéristiques seront ensuite exploitées pour modéliser le fonctionnement global du système et écrire le programme de simulation qui jouera le rôle du modèle de prédiction. Il suffit alors de tester les scénarios pour trouver celui qui répond bien aux objectifs de l'étude. Contrairement à la simulation, le machine Learning, nécessiterait un jeu de données (étiqueté ou non) qui relie le processus d'approvisionnement à celui de l'expédition point par point. On en déduit alors que le ML ne peut pas être directement exploité dans le contexte des systèmes logistique organisé sur stock. Il peut néanmoins être combiné à la simulation. Dans ce cas la simulation fournirait les données étiquetées en grande quantité et le machine Learning développerait le modèle de prédiction.

Dans une organisation à la commande, c'est la demande du client qui déclenche toutes les étapes du système logistique. Les processus d'approvisionnement et d'expédition sont alors couplés pour chaque commande. La simulation répond très bien également à ce genre de problèmes. La collecte de données se déroule de la même manière que dans le cas de l'organisation sur Stock. Dans ce contexte par contre le ML est exploitable du fait que le jeu de données (étiqueté ou non) qui relie le processus d'approvisionnement à celui de l'expédition point par point est disponible. De la même manière que pour l'organisation sur stock, le ML peut être combinée à la simulation dans le contexte de l'organisation à la commande.

Cette analyse ne concerne pas des problèmes industriels isolés tels que la maintenance prédictive, le contrôle de la qualité d'une opération, la sélection des fournisseurs ou encore la prévision de la demande.

Tableau 02 : complémentarité de la simulation et du ML

		Règles de fonctionnement	
		Connues	***Inconnues***
Type d'organisation	***Sur Stock***	▪ Simulation ▪ Combinaison	Machine Learning non supervisé
	A la commande	▪ Machine Learning ▪ Simulation ▪ Combinaison	Machine Learning Supervisé

3. ANALYSE D'UN CAS D'ETUDE

3.1. Spécification du Problème initial

Rockwell Shipping Conglomerate (RSC) est un leader dans le transport de produits en vrac aux clients à travers le monde. Dans le monde d'aujourd'hui, ces produits sont principalement transportés par barges.

3.2. Règles de fonctionnement :

Les règles de fonctionnement du cas d'étude initial sont les suivantes :

- ***R1*** : Cinq types de matières sont déplacés de 5 sites fluviaux au port d'expédition. Ces cinq types sont le charbon, le gravier, le sable, le bois et les matières recyclables.
- ***R2*** : Chaque site a un taux d'arrivée quotidienne de matières. Ce taux horaire d'arrivée est la moyenne d'une exponentielle. Quand un camion de matière arrive, il sera d'un type de matière donné en fonction des pourcentages de ce site. Par exemple, s'il y a une arrivée à l'heure 1, alors cette matière sera l'une des cinq types. Seuls certaines matières sont expédiées à partir de chaque site.
- ***R3*** : Chaque type de matière sur chaque site fluvial a une quantité limitée d'espace en tonnes métriques sur le site donné. S'il n'y a pas assez d'espace, le camion

devra attendre jusqu'à ce qu'il y ait suffisamment d'espace pour son type de matière.

- ***R4*** : La tâche principale de chaque site de la rivière est de charger ses barges dédiées avec la matière et les envoyer à l'installation d'expédition.
- ***R5*** : On suppose que les barges transportent un seul type de matière à la fois. Chaque barge peut contenir jusqu'à 5 tonnes métriques. Une barge tentera de charger la matière qui a le plus grand inventaire.
- ***R6*** : Les barges chargées sur chaque site de la rivière ont différents temps de transit à l'installation d'expédition, il dépend de l'emplacement du site sur la rivière.
- ***R7*** : Chaque site de la rivière n'a qu'un seul poste d'amarrage pour le chargement du matériel sur la barge.
- ***R8*** : Les installations de traitement et d'expédition ne sont pas une contrainte dans le système. Le temps pour qu'une barge effectue un voyage à l'installation d'expédition, décharger, et revenir au site fluvial est considéré comme un retard en raison de manque de données détaillées. Le travail n'est pas une contrainte sur les sites de la rivière ou l'installation d'expédition.

La demande pour les matières premières et recyclées a poussé la RSC de prendre en considération l'impact d'une augmentation de 50% de l'arrivée des produits à chacune de ses 5 sites fluviaux sur la rivière Limlight vers les installations d'expédition et de traitement à l'embouchure de la rivière.

3.3. Collecte de données

Les paramètres d'actions identifiés dans ce problème sont présentés dans ce qui suit :

1. Taux moyen d'arrivée pour chaque site fluvial
2. Tonnes métriques par arrivée
3. Pourcentage de matière pour chaque type de minerai
4. Temps de déchargement de la matière à chaque site fluvial
5. Temps de chargement pour une barge à chaque site fluvial
6. Temps de transit aller-retour de chaque site fluvial aux installations d'expédition et de retour sur le site fluvial
7. Nombre actuel de barges par site fluvial
8. Un « instantané » initial de l'inventaire actuel des matières de chaque site fluvial pour chaque type de minerai
9. Niveau d'inventaire maximal sur chaque site pour chaque type de matière

Les paramètres d'évaluation considérés pour trouver des solutions à ce problème sont présentés dans ce qui suit :

- Le temps d'attente des camions pour décharger la matière
- La file d'attente des camions aux postes de déchargement de la matière
- Le taux d'occupation des barges

3.4. Analyse de l'applicabilité de la simulation / Machine Learning

Le tableau 3 présente divers scénarios (Si) que l'on peut étudier par simulation et/ou ML. Ceux-ci sont issus du cas d'étude initial et se situe au niveau de la SC globale ou d'un des maillons de cette chaine. Le tableau montre pour chaque scénario, les solutions que l'on peut adopter en fonction de la connaissance ou non des règles de fonctionnement R1, R2, …, R8 présentées ci-dessous.

Conclusion

Dans ce papier, nous nous sommes posé les questions suivantes : Est ce que le ML peut répondre à tous les problèmes d'aide à la décision de la SC ? Qu'apporte de plus le ML par rapport aux outils classiques de prise de décision en particulier la simulation à événement discret ? est ce que le ML et la simulation sont similaires, contradictoires, complémentaires, …, dans le contexte de la SC ? L'étude que nous avons conduit a révélé plusieurs résultats.

Tout d'abord, le ML ne peut pas traiter tous les problèmes d'aide à la décision dans le contexte de la SC. Nous avons en effet démontré que dans le cas d'une organisation sur stock, il est impossible d'obtenir un jeu de données (étiqueté) qui relie les entrées aux sorties, même avec l'existence d'un système d'information performant.

Dans le cas ou le modèle est connu, il n'y a pas un problème que l'on peut traiter avec le ML et que l'on ne peut pas traiter avec la simulation à événement discret. Cependant, le principal intérêt du ML par rapport à la simulation réside dans le traitement des problèmes ou la modélisation de la SC se trouve complexe voire impossible. Mais le revers de la médaille est que le ML nécessite la disponibilité des jeux de données importants, ce qui peut également entraver son utilisation. D'un autre coté, la simulation ne peut pas aboutir au scénario optimal tout au contraire du ML qui permet d'aboutir à une fonction de prédiction que l'on peut optimiser. Quand le modèle est inconnu, on ne peut avoir recours à la simulation. Le ML est alors l'unique solution.

En conclusion, la logique du ML et la simulation sont différentes certes, mais ils ne sont pas contradictoires. On peut les utiliser en effet de manière complémentaires dans le contexte de la SC quand le modèle est connu. La simulation permettrait alors de générer un nombre suffisant de jeux de données pour permettre au ML de déterminer la fonction de prédiction.

REFERENCE

[1] Simulation with Arena, W. David Kelton, Randall P. Sadowski, Nancy B. Zupick, sixth Edition, Mc Graw Hill Eduction, 2015

[2] Apprendre le machine learning en une semaine, Guillaume Saint-Cirgue, 2019, https://machinelearnia.com, last accessed 18/05/2020

[3] Machine Learning Mastery With Python Mini-Course, Edition v1.2, 2017, Jason Brownlee, http://MachineLearningMastery.com, last accessed 18/05/2020

[4] Machine Learning Fundamentals, https://towardsdatascience.com/machine-learning-basics-part-1-a36d38c7916, last accessed 18/05/2020

[5] How the Digital Economy is Impacting the Supply Chain, Chase Charles, Journal of Business Forecasting, Summer 2019, Vol. 38 Issue 2, p16-20, 4p

[6] How advanced technologies are affecting supply chain software: From AI to ML to IoT, the new crop of supply chain technologies support a world where companies can use the past to predict the future, MCCREA, BRIDGET, Supply Chain Management Review. Sep/Oct 2019, Vol.23 Issue 5, p50-56, 4p

[7] The Smart Supply Chain : A Digital Revolution, Crawford, Craig, AATCC Review; May/Jun2019, Vol.19 Issue3, p38-45, 8p

[8] Application of Artificial Intelligence in Automation of Supply Chain Management, Dash Rupa, McMurtrey Mark, Rebman Carl, Kar Upendra K., Journal of Strategic Innovation & Sustainability. 2019, Vol.14 Issue 3, p43-53, 11p

[9] Applying machine learning to the dynamics election of replenishment policies in fast-changing supply chain environments, Priore Paolo, Ponte Borja, Rosillo Rafael, de la Fuente David, International Journal of Production Research, Jun 2019, Vol.57 Issue 11, p3663-3677, 15p

[10] An Investigation on Machine Learning Approaches in Supply Chain Forecasting: A Survey, Prahathish, K. Naren, J. Vithya, Dr.G. Akhil, S. Kumar, K. Dinesh Gupta, S. Sai Krishna Mohan, International Journal of Psychosocial Rehabilitation.2019,Vol. 23 Issue 1, p385-393, 9p

[11] MAKING THE CASE FOR AI and Machine Learning in Supply Chain Planning, Supply Chain Management Review. Jan/Feb2020, Vol.24 Issue 1, p9-9, 1p

[12] UNISON data-driven intermittent demand forecast framework to empower supply chain resilience and an empirical study in electronics distribution, Fu, Wenhan; Chien, Chen-F, Computers & Industrial Engineering. Sep 2019, Vol. 135, p940- 949, 10p

[13] Learning to Select Supplier Portfolios for Service Supply Chain, Zhang R; Li J; Wu S; Meng D; PloS one [PLoSOne] 2016 May 19; Vol.11(5), pp.e0155672. Date of Electronic Publication : 2016 May 19

[14] Supplier Selection in Supply Chains: ASWOT Guided Artificial Intelligence Approach, Aggarwal, Ajay K. Davè, Dinesh S., IUPJournal of Supply Chain Management. Sep 2019, Vol.16 Issue 3, p27-35, 9p

[15] A supervised machine learning approach to data-driven simulation of resilient supplier selection in digital manufacturing, Cavalcante, Ian M. Frazzon, Enzo M. Forcellini, Fernando A. Ivanov, Dmitry, International Journal of Information Management. Dec 2019, Vol. 49, p86-97, 12p

[16] Predicting supply chain risks using machine learning : The trade-off between performance and interpretability, Baryannis George, Dani Samir, Antoniou Grigoris, Future Generation Computer Systems, Dec 2019, Vol.101, p993-1004, 12p

[17] A Novel Hybrid Artificial Intelligence Based Methodology for the Inventory Routing Problem, Boru Aslı, Dosdoğru Ayşe Tuğba, Göçken Mustafa, Erol Rızvan, Symmetry (20738994), May 2019, Vol.11 Issue 5, p717, 1p

[18] Simulation vs. Machine Learning, https://vortarus.com/simulation-vs-machine-learning/, last accessed 18/05/2020

Tableau 03 : Scénarios du cas d'étude

Typologie de production	***Exemple***	***Règles de fonctionnement Connues***			***Règles de fonctionnement Inconnues***		
		Simu	**Machine Learning**	**Simulation / Machine Learning**	**Simu**	**Machine Learning**	**Simu/ML**
Sur Stock	***Niveau Supply Chain :*** S1 : Prédire le nombre de barge nécessaire pour gérer une augmentation donnée du taux d'arrivée de matières sur chaque site fluvial sans dépasser l'espace de stockage pour les types de matières. Vérifier s'il y'a d'autres options que l'ajout de barges pour gérer l'augmentation de 50% sur chaque site de la rivière ?	Oui	Non. Pas de Dataset étiqueté	Oui. Supervisé (Régression). Dataset généré par simulation	Non	Non. Pas de Dataset étiqueté. Le Non-supervisé est possible	Non
	Niveau Maillons de la Supply Chain : S2 : Prédire les ruptures de stocks en fonction de : fournisseurs, distance, type de matériau, état des routes, condition météorologique, … S3 : Prédire la durée de voyage d'une barge en fonction de : la distance, le type de matériau, conditions météorologiques, état du fleuve	Oui	Oui. Supervisé (Régression)	Oui. DataSet généré par simulation	Non	Possible (existence du dataset). Supervisé (Régression).	Non
	Niveau Supply Chain : S4 : Quelles Combinaisons de paramètres d'action : • Ne génère pas un dépassement de l'espace de stockage • Génère des classes de niveaux de stocks prédéfinies	Oui	Non. Pas de Dataset étiqueté	Oui. Supervisé (Classification). Dataset généré par simulation	Non	Non. Pas de Dataset étiqueté. Le Non-supervisé est possible	Non
A la commande	C1 : Prédire le nombre de barges nécessaire pour satisfaire un carnet de commande C2 : Prédire le temps d'exécution d'une commande	Oui	Oui. Supervisé (Régression)	Oui. Dataset généré par simulation	Non	Oui. Supervisé (Régression)	Non
	C3 : Caractérisation des commandes : satisfaite / non satisfaite	Oui	Oui. Supervisé (Classification)	Oui. Dataset généré par simulation	Non	Oui. Supervisé (Classification)	Non
	C4 : Prédire l'état de la commande en temps réel	Non	Oui. Supervisé (Rég / Class) en cascade	Non	Non	Oui. Supervisé (Rég / Class) en cascade	Non

13^{th} *International Conference on Modeling, Optimization and Simuation* - MOSIM*'20 - November 12-14, 2020*
Agadir - Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

A FINANCE DRIVEN SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN MODEL

Hamidreza REZAEI[1,2], Nathalie BOSTEL[3,2], Vincent HOVELAQUE[4], Olivier PÉTON[1,2]

[1] IMT Atlantique, 4 rue Alfred Kastler, Nantes, France
[2] LS2N, UMR CNRS 6004, Nantes, France
[3] Université de Nantes, Nantes, France
[4] Univ-Rennes, CNRS, CREM - UMR 6211, F-35000 Rennes, France
hamidreza.rezaei@imt-atlantique.fr, nathalie.bostel@univ-nantes.fr,
vincent.hovelaque@univ-rennes1.fr, olivier.peton@imt-atlantique.fr

ABSTRACT: *We propose a supply chain network design model focusing on the interactions between logistic and financial considerations. From the logistic point of view, this model determines the optimal location of production facilities and the assignment of these facilities to customers. From the financial point of view, it plans logistics decisions such that a financial indicator is maximized. We propose to use the Adjusted Present Value (APV) as the objective function.*

KEYWORDS: *Supply chain, network design, facility location, finance, Adjusted Present Value, Z-score*

1 INTRODUCTION

Supply Chain Network Design (SCND) aims at optimizing strategic decisions such as "where" and "when" to locate facilities. It also determines the capacity of facilities and product flows in logistics networks. The primary goal in classical SCND models is to maximize the profit or, equivalently, to cut logistics costs.

In this paper we focus on the interactions between the logistic and financial considerations in SCND. At least two financial impacts must be studied. The first one concerns the funding of logistics decisions. There are several means to finance big investment over a long term horizon. This funding may use internal financial resources that the company accumulated prior to the investment. In this case, the investment decision must be anticipated. It can also be financed by borrowing. These two funding levers modify the financial structure of the company and, subsequently, some of its financial ratios. This may have a considerable impact on the future value of the company.

The importance of incorporating financial considerations into strategic decisions, in particular supply chain management decisions, has been reported many times in the literature. Shapiro (2004) discusses the links between supply chain, demand, and corporate financial decisions at the strategic level. He mentions the strong interaction between the financial factors and the strategic planning of firms and organizations. In the context of closed-loop supply chain network design, Ramezani et al. (2014) mention that the majority of studies consider the financial aspects as endogenous variables, and only very few studies consider these aspects as exogenous variables used in constraints and in the objective function. It is striking to see that financial considerations are very often considered in the literature as side constraints, but are never in the core of the decision model. The goal of this paper is to fill this gap by proposing a mathematical model for the joint optimization of the supply chain network design and of the firm's value.

2 FINDING A RELEVANT FINANCIAL OBJECTIVE FUNCTION

2.1 Capital structure optimization

The question of defining the optimal capital structure (Modigliani and Miller, 1963) refers to the debt over equity ratio. This question arises when large investments must be decided, which is exactly the case in strategic supply chain management decisions. The corresponding large investments can be financed by the equity and by the debt. In the first case, the necessary funds are supported by the shareholders or generated by the firm's activities. In the second case, they are borrowed from banks and financial institutions. The most significant incentive of debt financing, called *tax shield benefit* (TSB) is related to the corporate income tax system. Given that the interest expenses associated with the debt are tax-deductible, the TSB is proportional to the corporate tax rate as well as the amount borrowed to the bank. It is thus, easy to calculate.

The main risk of debt financing is the possibility of bankruptcy if a firm is unable to repay debts. There is a vast literature dedicated to the evaluation of bankruptcy cost. We consider the *expected bankruptcy cost*, which combines an estimation of the cost of bankruptcy, denoted BC and the probability π of going bankrupt. The expected bankruptcy cost EBC is estimated as follows (Damodaran, 2012):

$$EBC = \pi \times BC.$$

The valuation of the bankruptcy cost BC follows the model of Leland (1994). Let UV represent the *unlevered value* of the firm, i.e. its value under all-equity financing. When bankruptcy occurs, a firm loses a fraction $0 \leq \beta \leq 1$ of its unlevered value. Then,

$$BC = \beta \times UV.$$

Myers (1984) introduced the *trade-off theory*, in which the TSB is balanced by the dead-weight bankruptcy cost. According to this theory, there is a debt to equity ratio, driving the firm to its maximum value.

This mechanism is illustrated by Figure 1. When the debt level increases (horizontal axis), both the value of TSB and BC increase. It is assumed that the tax shield, represented by the black solid line increases roughly linearly, while BC is nonlinear. Thus, the firm's value (represented by the blue curve) first increases, then reaches an optimal value and then decreases. The highest point of the firm's value curve helps determine the optimal debt value.

2.2 Z-score

The Z-score is an econometric scoring tool, developed in the late 60s (Altman, 1968; Beaver, 1968), used in decisions to grant credit limits. It is one of the most popular bankruptcy predictors for companies and organizations. Its main use is to establish a probability of default at 2 years on the basis of 5 financial ratios. We use the following Z-score formula for private manufacturing companies:

$$z = 0.717X_1 + 0.847X_2 + 3.107X_3 + 0.420X_4 + 0.998X_5, \quad (1)$$

where X_1 is the *Working capital/Total assets* ratio, X_2 is the *Retained Earnings/Total assets* ratio, X_3 is the *Earnings Before Interest and Taxes (EBIT)/Total assets* ratio, X_4 is the *Book value of equity/Book value of total liabilities* ratio and X_5 is the *Sales/Total Assets* ratio.

The primary goal of the Z-score is to predict bankruptcy. Its value can be converted to a probability π of bankruptcy with a logistic function (see, e.g. Hillegeist et al. (2014) and Kallunki and Pyykkö (2013)).

$$\pi = \frac{e^{-z}}{1 + e^{-z}}. \quad (2)$$

2.3 Adjusted Present Value (APV)

Let us first recall the definition of the Net present Value (NPV). It is defined as the value of a project's future cash flows (positive or negative), translated into today's money i.e., the difference between a project's value and its costs over time. Given a set T of time periods, the values of the profit and fixed assets at each period $t \in T$ and the cost of equity r_E, $NPV = \sum_{t \in T} \frac{Profit_t - FixedAsset_t}{(1+r_E)^t}$ is used as an objective function in numerous SCND papers, especially in models describing real-life applications or complex supply chains.

The Adjusted Present Value (APV), proposed by Myers (1974) is mainly used for the valuation of investment projects. Practically, it is calculated as follows:

$$APV = NPV + TSB - EBC. \quad (3)$$

The main principle of the APV is to adjust the unlevered value of the firm by considering the debt effect. The total enterprise value equals the sum of the values of the operating assets plus the present value of debt tax shields. The main contribution of our mathematical model is to adopt APV as the objective function in a classical SCND model, instead of classical cost based objective functions, so as to maximize the overall firm's value.

3 PROBLEM SETTINGS AND MATHEMATICAL FORMULATION

3.1 Problem statement

We consider a supply chain consisting of a set I of customers delivered from a set J of potential production centers belonging to the same company. Customers' locations and demands are known and considered deterministic over a time horizon T decomposed in discrete time periods, typically years. We also define $T^* = T \backslash \{0\}$. The main goal of the SCND problem is to select a subset of production centers among the whole set J and to assign customers' demand to these production centers, at each time period, so as to maximize the adjusted present value of the company.

Satisfying customers' demand requires a certain number of logistic decisions: opening production facilities, setting production levels and carrying the goods from facilities to customers. The mathematical model presented in this section aims at determining the list of

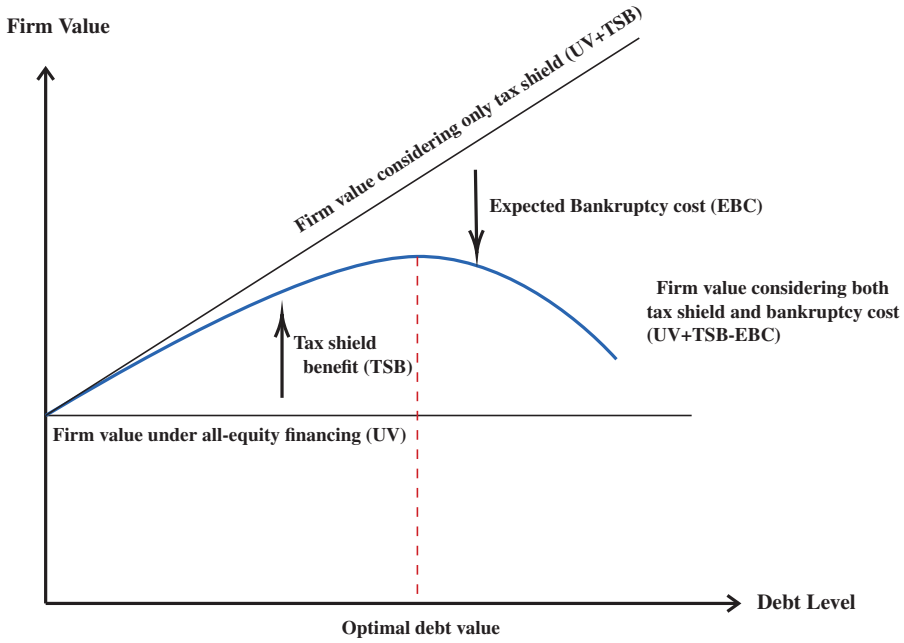


Figure 1 – Trade-off theory for the determination of the optimal debt value

candidate facilities selected, and the product flows from these facilities to customers at each time period, in order to maximize an objective function based on both financial and logistic goals. Since one of the main goals of this paper is to show the interactions between logistic and financial decisions, we adopted a set of simple logistic rules that are not too constraining. We assume that there is no closing option for the facilities. In other words, once a facility is selected, it will stay open until the end of the time horizon. The generalization of this work to a network with both opening and closing options does not raise theoretical difficulties.

The main assumption is that it is not mandatory to serve every particular customer's demand. This can be justified by at least two reasons. First, some customers may be simply too far from production centers, so that delivering them would result in a loss of money. Second, enforcing the delivery to all customers would generate unrealistic solutions in which large fixed cost would be paid to open facilities that deliver only a few customers. We do not impose any single sourcing constraint: customers can be delivered from distinct facilities at distinct periods. However, no partial satisfaction of a particular customer's demand is authorized. Moreover, if a customer's demand is satisfied within a given time period, then it must be satisfied again in all subsequent time periods. Unsatisfied customers' demands are simply lost ; back-orders are not authorized. For each time period, the fraction of the total demand that is satisfied is called *fill rate*.

All supply chain operations have a potentially large cost that must be financed with either debt or equity. Companies generally mix debt financing and equity financing. Thus, for a given decision, the amount to be borrowed to banks and the duration of repayment varies with respect to this mix. We define a set B of available bank offers. Each bank offer is modeled by a tuple containing the maximum amount of money that can be borrowed, an interest rate and a repayment duration.

Incorporating financial decisions into an SCND problem amounts to select a subset of candidate bank offer and optimize the financial flows of the company. The objective function of the optimization problem considered is to maximize the firm's value at the end of the time horizon, where the APV described in section 2.3 is used as a proxy for the firm's value. We consider only two modes for financing supply chain strategic decisions: equity (using the available cash accumulated in previous periods) and debt (selecting bank offers). This study does not consider capital increase, which decision depends on strategic objectives that can hardly be modeled by mathematical models. Moreover, our decision making framework does not consider any decision at the tactical or operational decision levels. The next sections detail the proposed MILP formulation. Section 3.2 describes the variables and constraints related to logistic decisions. Section 3.3 does the same for financial decisions. Section 3.4 describes the calculation of the APV.

3.2 Logistic constraints

For any $j \in J$ and $t \in T$, the binary variables y_{jt} equal 1 if the facility $j \in J$ is selected at period $t \in T$, and 0 otherwise. As mentioned before, once a facility is selected, it cannot be closed later. Besides, the number of facilities selected is bounded above by a number J_{max}. These assumptions are modeled by constraints (4) and (5).

$$y_{j,t-1} \leq y_{jt} \qquad \forall j \in J, t \in T^* \qquad (4)$$

$$\sum_{j \in J, t \in T^*} y_{jt} - y_{j,t-1} \leq J_{max} \qquad (5)$$

Constraints (6), (7), (8) and (9) are related to the delivery of customers. Due to different trade rules between geographical areas as well as various logistic constraints, it might be practically impossible to deliver some customers from some facilities. Thus, we introduce the binary notation v_{ij} which is set at value 1 if the customer $i \in I$ can be delivered by the facility $j \in J$. Moreover, we denote by q_{ijt} the quantity delivered by facility $j \in J$ to customer $i \in I$ at time period $t \in T$.

With these notations, constraints (6) set q_{ijt} to 0 if customer $i \in I$ cannot be served by facility $j \in J$ or if facility $j \in J$ is not operating at period t. The binary variables θ_{it} take value 1 if customer $i \in I$ is served at period $t \in T$, and 0 otherwise. Constraints (7) calculate the total quantity delivered to each customer. It is either 0 (when $\theta_{it} = 0$) or the value of the customer's demand.

According to the constraints (8), once a customer is served, it will be served at all subsequent periods. The capacity constraints (9) enforce the total quantity shipped by one facility $j \in J$ to be at most equal to its capacity k_j. Note that with these constraints, one can model several possible sizes of facilities, by setting several candidate facilities, with distinct capacities, at the same location.

$$q_{ijt} \leq v_{ij}\ d_{it}\ y_{jt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T^* \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} q_{ijt} = d_{it}\ \theta_{it} \qquad \forall i \in I, t \in T^* \quad (7)$$

$$\theta_{it} \geq \theta_{i,t-1} \qquad \forall i \in I, t \in T^* \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} q_{ijt} \leq k_j\ y_{jt} \qquad \forall j \in J, t \in T^* \quad (9)$$

The constraints (10)–(13) calculate the costs related to the manufacturing and transportation of goods. Each candidate facility $j \in J$ has a fixed cost f_j, which is paid once when the facility is selected, as well as the processing cost μ_j for each unit of product processed by this facility. We consider a unit transportation cost w. Without loss of generality, it is the same in the whole network. The distance $dist_{ij}$ between two locations $j \in J$ and $i \in I$ is denoted as $dist_{ij}$.

Constraints (10) calculate the total processing cost $ProcCost_t$ at time period $t \in T$ by summing the processing costs at every production center. Constraints (11) give an estimate of the total transportation cost $TrnCost_t$ at period $t \in T$. Constraints (12) compute the sum of the fixed cost of selected candidate locations. Finally, constraints (13) calculate the total amount of logistic expenses Exp_t at time period $t \in T$.

$$ProcCost_t = \sum_{j \in J} \mu_j \sum_{i \in I} q_{ijt} \quad \forall t \in T^* \qquad (10)$$

$$TrnCost_t = w \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} dist_{ij} \times q_{ijt} \quad \forall t \in T^* \qquad (11)$$

$$FixedCost_t = \sum_{j \in J} f_j \times y_{jt} \qquad \forall t \in T^* \qquad (12)$$

$$Exp_t = ProcCost_t + TrnCost_t + FixedCost_t \quad \forall t \in T^* \qquad (13)$$

Considering a selling price p_i to customer $i \in I$, the total revenue Rev_t at period $t \in T$ is calculated with constraints (14).

$$Rev_t = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} p_i \times q_{ijt} \qquad \forall t \in T^* \qquad (14)$$

3.3 Financial constraints

In this section, we present the financial constraints that relate to debt, equity, or a combination of both.

3.3.1 Debt Financing

Debt refers to the money borrowed to financial institutions on certain conditions subject to return. We consider a set B of bank offers, each of them consisting of an upper bound Z_b on the amount borrowed, a duration N_b (in years) of reimbursement, an interest rate α_b. The variables $Borrow_{bt}$ represent the amount of bank offer b borrowed at period t. If some bank offer $b \in B$ is activated at period t_b, then the reimbursement period is the interval $[t_b + 1, t_b + N_b]$. The amount of bank offer b repaid at period $t \in [t_b + 1, t_b + N_b]$ is denoted $Repay_{bt}$.

The constraints (15) introduce the upper bounds Z_b while the constraints (16) calculate the value of $Repay_{bt}$ for each bank-offer and each period of interest, with the corresponding financial mathematics formula.

$$Borrow_{bt} \leq Z_b, \quad \forall b \in B, t \in T^* \quad (15)$$

$$Repay_{bt} = \frac{Borrow_{bt_b}\ \alpha_b\ (1+\alpha_b)^{N_b}}{(1+\alpha_b)^{N_b} - 1} \quad \forall b \in B, t \in [t_b + 1, t_b + N_b] \quad (16)$$

We define D_{bt} as the current debt associated with bank offer $b \in B$ at time period $t \in T \backslash \{0\}$. Given the interest rate α_b, the value of the interest at period t is given by constraints (17). The constraints (18) model the calculation of the current value D_{bt} of the debt related to bank offer b at period t. It is the value at the preceding period, augmented by the interest I_{bt} as well as the possible additional amount borrowed, and decreased by the amount repaid. In constraints (19), we define the total debt $Debt_t$ of the company at period t. Constraints (20) state that this total debt should not exceed some maximal level $MaxDebt$.

$$I_{bt} = \alpha_b\ D_{b,t-1} \quad \forall b \in B, t \in T^* \quad (17)$$

$$D_{bt} = D_{b,t-1} + I_{bt} + Borrow_{bt} - Repay_{bt} \quad \forall b \in B, t \in T^* \quad (18)$$

$$Debt_t = \sum_{b \in B} D_{bt} \quad \forall t \in T \quad (19)$$

$$Debt_t \leq MaxDebt \quad \forall t \in T \quad (20)$$

3.3.2 Equity Financing

Equity refers to the money supported by shareholders and also a portion of the generated revenues plowed back into the company after paying out the expenses as well as the shareholders' dividends. Assuming that there is no possibility of capital increase, equity is defined in the form of internal funds. Internal funds, which are used to be invested for the firms' long-term purposes, are a portion of cash left over for the companies. Thereby, internal funds at period $t \in T$, IF_t, are restricted by the available cash at the end of the preceding period, $Cash_{t-1}$, as stated in constraints (21)

$$IF_t \leq Cash_{t-1} \quad \forall t \in T. \quad (21)$$

In order to introduce constraints related to cash management, we first define intermediate notations in equations (22) to (26). First, the depreciation represents a yearly decrease of tangible assets' value over time. There are different methods to depreciate the firm's assets. Following Laínez et al. (2007), we implement the *straight-line* approach to calculate the depreciation of each facility $j \in J$ as a function of its initial value, IV_j, salvage value, SV_j, and lifetime, LT_j, according to the constraints (22).

$$Dep_j = \frac{IV_j - SV_j}{LT_j} \quad \forall j \in J \quad (22)$$

Constraints (23) define the yearly changes in the value of the fixed asset, ΔFA_t. It results from the opening cost o_j of the facilities and from the depreciation Dep_j.

$$\Delta FA_t = \sum_{j \in J} (o_j (y_{jt} - y_{j,t-1}) - Dep_j \times y_{j,t-1}) \quad \forall t \in T \quad (23)$$

The net changes in debt liabilities due to the bank at period $t \in T$, ΔLib_t, is computed by the constraints (24).

$$\Delta Lib_t = \sum_{b \in B} (Borrow_{bt} - Repay_{bt} + I_{bt}) \quad \forall t \in T \quad (24)$$

In constraints (25), the Earning Before Interest and Taxes (EBIT) at period $t \in T$, denoted $EBIT_t$, is the difference between the firm's revenues and expenses (before interest and tax) at period $t \in T$. A depreciation factor is considered for all open facilities.

$$EBIT_t = Rev_t - Exp_t - \sum_{j \in J} Dep_j \times y_{j,t-1} \quad \forall t \in T \quad (25)$$

In constraints (26), $NOPAT_t$ expresses the net operating profit after taxes of period $t \in T$. By definition, it is obtained by subtracting the interest expenses from the EBIT at period $t \in T$, and then multiplying the result by the term $(1-\tau)$, where τ is the firm tax rate.

$$NOPAT_t = (EBIT_t - \sum_{b \in B} I_{bt}) \times (1 - \tau)$$

$$\forall t \in T \quad (26)$$

At the strategic decision level, the level of cash at period $t \in T$, $Cash_t$, is a function of available cash at the end of the preceding period, $Cash_{t-1}$, net operating profit after tax, $NOPAT_t$, net changes in long-term investment, ΔFA_t, and net changes in long-term liabilities, ΔLib_t. Constraints (27) represent the above-mentioned relation.

$$Cash_t = Cash_{t-1} - \Delta FA_t + NOPAT_t + \Delta Lib_t \quad \forall t \in T \quad (27)$$

Constraints (28) explain how facility location decision are funded, either by internal funds (IF_t) or by the debt.

$$\sum_{j \in J} o_j (y_{jt} - y_{j,t-1}) = \sum_{b \in B} (Borrow_{bt}) + IF_t \quad \forall t \in T \quad (28)$$

3.4 Objective function

The objective function to be maximized is the Adjusted Present Value (APV), briefly introduced in equation (3). The detailed formulation of APV is given by equation (29).

$$APV = \sum_{t \in T} \frac{FCF_t}{(1 + r_E)^t} + \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} \frac{\tau \times I_{bt}}{(1 + \alpha_b)^t} - \pi \times BC \quad (29)$$

The first term of this objective function is based on the Future cash flows (FCF_t), that measure the firm's ability to generate cash. In other words, FCF_t is defined as the difference between both operating and non-operating cash inflows and outflows. Constraints (30) indicate how to calculate this indicator.

$$FCF_t = (1 - \tau) EBIT_t - \Delta FA_t \quad \forall t \in T, \quad (30)$$

In equation (29), the parameter r_E represents the cost of equity.

The second term of the objective function represents the net present value of the Tax Shield Benefit (TSB). The last term is the Expected bankruptcy Cost (EBC), which mainly depends on the Z-score value. The following set of equations defines the Z-score components listed in section 2.2.

The *total assets* for every period $t \in T$, denoted TA_t, is expressed by constraints (31). They include the cash at period t and the book value at period $t \in T$, which is calculated as the accumulated changes in fixed assets value, ΔFA_t, from period 1 to t.

$$TA_t = Cash_t + \sum_{t'=1}^{t} \Delta FA_{t'} \quad \forall t \in T \quad (31)$$

The *retained earnings* are defined as the net income left over for the company after distributing the dividends to its shareholders. With regards to ignoring the capital expenditures, no dividends are considered. Therefore, RE_t, which represents the value of retained earnings at the period t, is simply obtained using the constraints (32).

$$RE_t = RE_{t-1} + NOPAT_t \quad \forall t \in T \quad (32)$$

The *book value of equity* equals the sum of the retained earnings and the paid-in capital by the shareholders. However, ignoring capital expenditure, BE_t, which is the book value of equity at period $t \in T$ is represented by the constraints (33).

$$BE_t = RE_t \quad \forall t \in T \quad (33)$$

The *book value of liabilities*, BL_t, is defined as the portion of long-term debts due to the bank at period $t \in T$. It is formulated in the constraints (34).

$$BL_t = \sum_{b \in B} \sum_{t'=1}^{t} (Borrow_{bt'} - Repay_{bt'} + I_{bt'}) \quad \forall t \in T \quad (34)$$

Finally, the *sales*, at period $t \in T$ are directly given by the variables Rev_t defined by the equation (14).

Note that the Z-score components used in the mathematical model ($X_2 = RE_t/TA_t$, $X3 = EBIT_t/TA_t$, $X4 = BE_t/BL_t$ and $X5 = Rev_t/TA_t$) are all nonlinear. The linearization of these ratios is fully detailed in Rezaei et al. (2020).

4 NUMERICAL EXPERIMENTS

This section presents the computational experiments conducted to evaluate the performance of the pro-

posed mathematical model. To this aim, we generated a set of instances. The number of customers in these instances is between 60 and 180, and the number of candidate facilities is always 10% of the number of customers. Extensive details about the data generation can be found in Rezaei (2020).

FCF is used as an objective function in many SCND models. Thus, the impact of handling financial indicators in our model is highlighted through a comparison between the results of APV maximization and of the FCF maximization. Concretely, we compare two models: (i) a restricted model whose objective function is $\sum_t FCF_t$ and where the only equity financing constraints considered are those related to FCF_t and (ii) an exhaustive model whose objective function is the APV and with all constraints considered.

For each instance, the network configurations obtained under FCF and APV maximization are shown in Table 1. The first column of the table represents the instance name, built from the number of customers and the coordinates pattern (R=random, C=clustered). The next five columns detail the list of facilities opened at each time period. The eight column represents the fill rate reached in the final period. In order to compare the FCF– and APV–driven solutions, we have *a posteriori* calculated the APV corresponding to solution obtained under FCF maximization. The percentage indicated in the ninth column represents the gap between both APVs.

To get a more detailed picture of the model's decision mechanism, Figures 2 and 3 present the optimal network configurations for instance 150-C, obtained under FCF or APV maximization, respectively.

The map represented in Figures 2 and 3 is divided into 3 markets standing for different economic parameters. The markets are represented by different colors. As presented in table 1, maximizing FCF amount to open facilities 1,4,7 and 11 at period 1, facility 14 at period 2 and facility 8 at period 4. Maximizing APV amounts to select the same facilities at different time periods. The first reason for this difference is the impact of the tax shield benefit, which is higher in APV maximization. After opening facilities 1,4 and 11 at period 1, the company has used almost all its debt capacity. It still can open facility 7 in the first period using equity financing or open facility 7 at a later period using a larger debt capacity. The same mechanism explains the more gradual network expansion under APV maximization.

The second reason is the time value of money, which is ignored by FCF. Opening facility 7 at period 2 rather than at period 1 as well as opening facility 14 at period 3 rather than at period 2 leads to a lower fill rate (we recall that the firm is nonsensitive to the consumer's behavior and that no back-order cost is

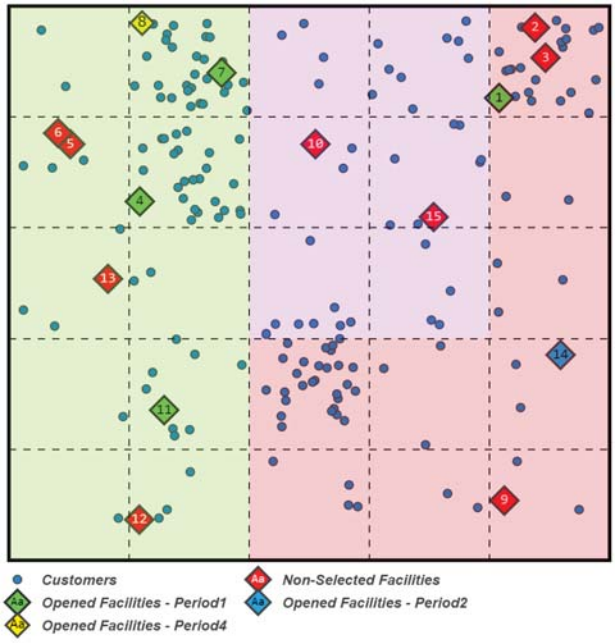


Figure 2 – Instance 150-C: network under FCF maximization

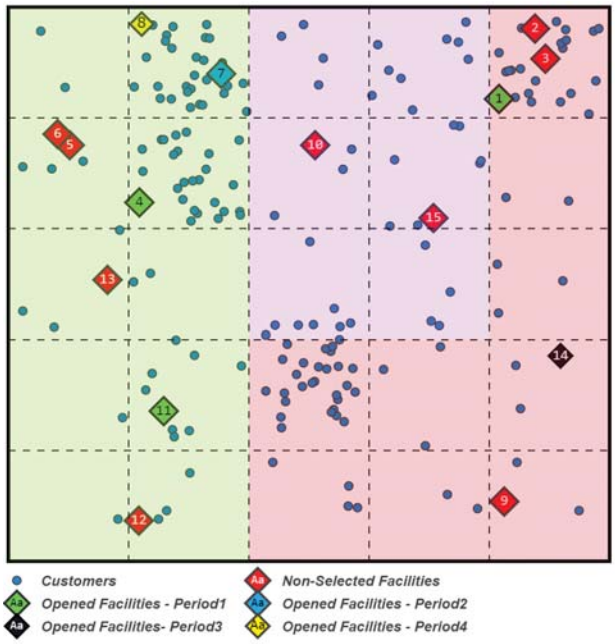


Figure 3 – Instance 150-C: network under APV maximization

Instance	Objective function	Open Facilities					Fill Rate	Firm value gap
		t=1	*t=2*	*t=3*	*t=4*	*t=5*		
60-R	FCF	1,3		6			84%	8.5%
	APV	1	6				50%	
60-C	FCF	2,5	1				86%	6.5%
	APV	2.5					61%	
90-R	FCF	1,2,4					74%	0%
	APV	1,2,4					74%	
90-C	FCF	3,6	2				73%	3.5%
	APV	3,6		2			72%	
120-R	FCF	3,4,9	8	10,12			91%	2.5%
	APV	4,5,9	10	8,12			91%	
120-C	FCF	2,4,5,6,12					98%	2.5%
	APV	2,4,5,12	6				97%	
150-R	FCF	6,7,10,11,14	3				89%	3.5%
	APV	6,7,10,11,14		3			87%	
150-C	FCF	1,4,7,11	14		8		84%	11%
	APV	1,4,11	7	14	8		83%	
180-R	FCF	2,3,5,11,12,16					75%	6%
	APV	2,3,5,11,16		12			74%	
180-C	FCF	7,9,11,14,18	13				85%	4%
	APV	7,9,11,18	13				73%	

Table 1 – Network configuration under FCF and APV

assumed for unsatisfied customers), higher tax shield benefit and lower investment value due to the time value of money.

5 CONCLUSION

In this paper, we proposed an extension of traditional supply chain network models, driven by financial considerations. We propose to use the Adjusted Present Value (APV) as a performance indicator and show that this indicator enables decision makers to find a trade-off between logistic and financial priorities. The mathematical model is tractable by state of the art mixed integer linear programming solvers for realistic sizes of instances, opening perspectives for real-life applications. The numerical experiments show that using APV instead of traditional indicators does not bring considerable changes in the final configuration of the supply chain, but modifies its temporal implementation and can increase the firm value up to around 10%. Besides, focusing on the firm value rather on logistic costs tends to decrease the fill rate, i.e. the satisfaction of customers' demand. Further research could aim at investigating the trade-offs between the interest of various suply chain stakeholders.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been supported by ANR under the FILEAS-FOG - ANR-17-CE10-0001 project.

Altman, E. I. (1968). Financial ratios, discriminant analysis and the prediction of corporate bankruptcy, *The Journal of Finance*, 23(4): 589-609.

Beaver, W. H. (1968). Market prices, financial ratios, and the prediction of failure, *Journal of Accounting Research*, 6(2): 179-192.

Damodaran, A. (2012). Investment valuation: Tools and techniques for determining the value of any asset, Vol. 666, John Wiley & Sons.

Hillegeist, S.A., Keating, E.K., Cram, D.P. and Lundstedt, K.G. (2004). Assessing the Probability of Bankruptcy, Review of Accounting Studies,9,5-34.

Kallunki, J.-P. and Pyykkö, E. (2013). Do defaulting CEOs and directors increase the likelihood of financial distress of the firm?, Review of Accounting Studies, 18, 228-260.

Laínez, J.M., Guillén-Gosálbez, G., Badell, M, Espuña, A. and Puigjaner, L., (2007). Enhancing corporate value in the optimal design of chemical supply chains, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(23): 7739-7757.

Leland, H. E. (1994). Corporate debt value, bond covenants, and optimal capital structure, *The journal of finance*, 49(4): 1213-1252.

Modigliani, F. and Miller, M. H. (1963). Corporate income taxes and the cost of capital: a cor-

rection, *The American economic review*, 50(3): 433-443.

Myers, S. C. (1974). Interactions of corporate financing and investment decisions-implications for capital budgeting, *The Journal of Finance*, 29(1): 1-25.

Myers, S. C. (1984). The capital structure puzzle, *The journal of finance*, 39(3): 574-592.

Ramezani, M., Kimiagari, A. M. and Karimi, B. (2014). Closed-loop supply chain network design: A financial approach, *Applied Mathematical Modelling*, 38(15-16): 4099-4119.

Rezaei, H., Bostel, N., Hovelaque, V. and Péton, O. (2020). An adjusted present value based supply chain network design model, Technical report, IMT Atlantique.

Shapiro, J. F. (2004). Challenges of strategic supply chain planning and modeling, *Computers & Chemical Engineering*, 28(6-7): 855-861.

OPTIMISATION CONJOINTE DE LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'ENERGIE, DE LA MAINTENANCE ET DES PIECES DE RECHANGE D'UN PARC EOLIEN

FAKER Abderrahmane, BOUSLIKHANE Salim

Universiapolis Bab Al Madina Quartier Tilila
Agadir, Morocco
abderrahmane.faker@e-polytechnique.ma,
bouslikhane.salim@gmail.com

HAJEJ Zied

LGIPM University of Lorraine
Metz, France
zied.hajej@univ-lorraine.fr

RESUME : *Dans ce travail, on cherche à optimiser conjointement la planification de la production, la maintenance et la gestion des pièces de rechange. L'objectif de notre modèle est de déterminer, pour chaque période de production, le nombre optimal d'éoliennes à faire fonctionner, ainsi que le taux de production d'énergie et le niveau de stock. En outre, notre modèle permet de planifier des actions de maintenance préventives durant un horizon donné a fin de réduire le taux de défaillances des éoliennes et en même temps d'optimiser les pièces de rechange en tenant compte de la croissance de dégradation des éoliennes en fonction de leurs taux de production et du temps.*

MOTS-CLES : Politiques de maintenance, Fiabilité des systèmes, Gestion de production, pièces de rechange, fonctionnement de l'éolienne.

1 INTRODUCTION

Améliorer la situation des parcs éoliens, nécessite de minimiser les coûts et maximiser la satisfaction de la clientèle. Ces deux objectifs ne peuvent être atteints sans une bonne gestion.

Dans ce contexte, de nombreuses recherches ont été menées dans le domaine industriel sur les pièces de rechange et l'optimisation de la planification de la maintenance comme solution pour minimiser les coûts et se prémunir contre une importante compétitivité. Dellagi et al (2020) ont développé un modèle d'analyse afin de déterminer un plan de maintenance intégré optimal et une gestion des pièces de rechange pour un système de fabrication constitué d'une seule machine. Huang et al 2008 ont proposé un modèle de politique de remplacement par blocs et d'examen périodique des stocks de pièces de rechange où le délai d'approvisionnement est aléatoire. Une telle optimisation peut être plus efficace si l'on considère la dégradation des machines dans le temps tout en planifiant des actions de maintenance. Pour l'énergie éolienne, Hajej et al 2017 ont effectué une maintenance intégrée liée aux éoliennes " production d'énergie ".

Pour L'interaction production/maintenance diverses recherches ont été effectuées pour traiter le problème de l'optimisation de la production conjointe et de la maintenance en considérant le cas de nombreuses machines. Dans ce contexte, on peut mentionner le travail de abdelrahim et vizvari (2016) qu'il était basée sur l'optimisation simultanée du flux de la production et de la maintenance préventive. Ce travail prend en compte l'interaction entre les deux services.

Dans notre cas, nous avons développé des stratégies de la maintenance intégrée à la production et de la gestion des piéces de rechange d'un parc eolien. Le principal résultat de notre modèle est qu'il permet de déterminer, pour chaque période de production, le nombre d'éoliennes fonctionnelles, la répartition de la production sur les machines nécessaires ainsi que le niveau des stocks. En outre, notre modèle permet de planifier la gestion des pièces de rechange et les actions préventives dans le temps et de se prémunir contre les défaillances imprévues, et ce en tenant compte de la dégradation des machines.

2 PROBLEMATIQUE ET DESCRIPTION GENERAL

Dans ce travail, nous soulevons le problème de l'optimisation conjointe de la planification de la production d'énergie et de la maintenance des parcs éoliens. Qui sont considérés comme des sites de production sensibles car leur production dépend principalement de la vitesse du vent qui est considérée comme une variable aléatoire. Par conséquent, la fiabilité de chaque éolienne est un facteur déterminant pour le succès de l'investissement dans l'énergie éolienne. Notre objectif est de satisfaire une demande d'électricité aléatoire sous un taux de service donné où tous les coûts de production, de stockage et de maintenance sont minimisés.

Il convient également de mentionner que le système est composé de nombreuses éoliennes identiques montées en parallèle. Le nombre d'éoliennes à utiliser pendant chaque période de production n'est pas le même, il représente donc une variable de décision notée M_k à déterminer.

L'idée générale de notre problématique consiste à déterminer les meilleures stratégies de production, de gestion des pièces de rechange et de maintenance. Pour réaliser cette optimisation conjointe, nous utilisons une méthode de résolution séquentielle. Sinon, après avoir formulé le problème du système de production et déterminé ses variables de décision, nous incluons les valeurs optimales

dans le modèle de maintenance afin de déterminer la stratégie optimale de maintenance caractérisée par la quantité des pièces de rechange le nombre optimal des actions de maintenance préventives.

3 NOTATION

3.1 Production

- Variables temporelles

  H : nombre de périodes de production.

  Δt : durée de chaque période de production (toutes les périodes de production sont égales).

  k : indice se référant à un numéro de période de production où k=1, 2..., H.
- La demande aléatoire

  D_k: Demande aléatoire pour la période k.

  μ^d : moyenne de la demande gaussienne.

  σ_d : Variance de la demande gaussienne.
- La variable de la décision

  M_k : Nombre d'éoliennes pendant la période k.

  P_k : Niveau de production global au cours du période k.

  $P_{j,k}$: Énergie produite par l'éolienne J pendant période k.

  S_k: Quantité d'énergie stockée pendant la période k.
- Les caractéristiques de vent :

  υci: la vitesse du vent minimale de foncionnement;

  υco: la vitesse du vent maximale de foncionnement;

  υr: Vitesse nominale du vent;

  υ: La vitesse du vent;

  a: Paramètres de forme du vent;

  c: Paramètres de l'échelle du vent;
- Les constantes :
  - P max: Puissance maximale de l'éolienne;
  - P_r: Puissance nominale de l'éolienne;
  - Θ: Taux de niveau de service;
  - $a1 + a2\ D_k$: Stock net optimal;
  - Cp: Coût de production de 1 kW;
  - Cs: Coût de stockage de 1 kW

3.2 Maintenance

- N: Nombre d'opérations de maintenance préventive sur l'horizon de planification;
- N*: Nombre optimal d'opérations de maintenance préventive sur l'horizon de planification ;
- T: Période de la maintenance préventive;
- T*: Période optimale de la maintenance préventive;
- H.Δt: Horizon de planification;
- $\lambda_{j,k}$: Taux de défaillance de la j^{éme} éolienne pendant la période k;
- $\lambda_{j,0}$: Taux de défaillance initiale de la j^{ème} éolienne;
- $\lambda_n(t)$: Taux de défaillance de l'éolienne dans les conditions nominales;
- $P_{j,k}$: Représente la cadence de production de la j^{éme} éolienne pendant la période k;
- $Pmax$: Représente le taux de production maximal de l'éolienne;
- β: Shape parameter of the wind turbine;
- η: Paramètre d'échelle de l'éolienne;
- MC_j: Coût d'entretien de la j^{éme} éolienne du parc éolien;
- MC: Coût d'entretien du parc éolien;
- Ccm: Coût de maintenance corrective (um);
- Cpm: Coût de maintenance préventive (um);
- $\bar{Y}j$: Nombre moyen de défaillances de la j^{éme} éolienne en fonction de sa production.

3.3 Les Pièce des Rechange

- *nrpp*: Nombre de pièces de rechange utilisées pour une maintenance préventive parfaite.
- *nrc*: Nombre moyenne des pièces de rechange utilisées pour une maintenance corrective.
- *De* (*P*,*Nb*) : Demande totale de pièces de rechange pour les actions de maintenance sur $H\Delta t$ en considérant la variation du taux de production à chaque période de production $[k\Delta t, (k+1)\Delta t]$
- *Cc*: Coût de passation d'une commande.
- *Cpos*: Coût de possession d'une pièce de rechange sur $H\Delta t$.
- *Ca*: le coût d'achat de la pièce de rechange unitaire.
- *C*(*Q*, *De*(*P*,*Nb*)): le coût total de la gestion des pièces de rechange (stockage, commande et achat)
- *CTT*: Coût total incluant les coûts de maintenance et de gestion des pièces de rechange.

4 ÉTUDE ANALYTIQUE

4.1 Production

La production d'énergie éolienne n'est pas une activité simple puisqu'elle dépend de la disponibilité du vent qui est considérée comme une variable aléatoire. Par conséquent, la production d'énergie éolienne est une tâche difficile qui nécessite une compréhension de la fonctionnalité et de la disponibilité des éoliennes afin d'assurer la satisfaction du client. Sachant que la vitesse du vent varie selon la distribution de Weibull (Carta et al, 2009) où sa fonction de distribution de probabilité (pdf) est exprimée comme suit :

$$f(\upsilon) = \frac{a}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{a-1}\exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^{a}\right) \qquad (1)$$

De nombreux chercheurs ont travaillé sur la détermination de l'énergie de sortie de l'éolienne, Aghazzaf and Najid 2008 ont estimé la puissance éolienne disponible Pwind,j de la j^{eme} éolienne qui s'exprime comme suit:

$$P_{j,k} = \int_{\upsilon c}^{\upsilon r}\left(\frac{a}{c}\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^{a-1}\exp\left(-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^{a}\right)\times P_{r,j}\times\frac{(\upsilon^a-\upsilon_c^a)}{(\upsilon_c^a-\upsilon_r^a)}\right) + \int_{\upsilon r}^{\upsilon f}\left(\frac{a}{c}\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^{a-1}\exp\left(-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^{a}\right)\times P_{r,j}\right)dv \qquad (2)$$

Où l'énergie globale produite pendant la période k est exprimée comme suit :

$$P_k = \sum_{j=1}^{M_k} P_{j,k} \qquad (3)$$

L'objectif du plan de production est de déterminer la meilleure combinaison d'éoliennes fonctionnelles au cours de chaque période, le niveau de production et les niveaux de stock qui minimisent les coûts totaux moyens sur un horizon temporel limité et ce en tenant compte de la nécessité de satisfaire la demande fluctuante.

- Fonction objective :
est de trouver Mk, Pjk et Sk pour minimiser

$$CT = \sum_{K=1}^{H}(Cs \times [S_K - (a_1 + a_2 \times D_K]^2) + \sum_{K=1}^{H-1} Cp \times (\sum_{j=1}^{M_k} P_{jk})^2 \quad (4)$$

Nos principales contraintes peuvent être données par :

$$m \leq Mk \leq M \quad (5)$$

$$Sk = Sk - 1 + Pk - Dk \quad (6)$$

$$Prob(Sk \geq 0) \geq \theta \quad (7)$$

L'algorithme de la méthode de résolution a été développé sur MATLAB

4.2 Stratégie de la maintenance intégrée à la gestion des pièces de rechange

Inspirés notamment des travaux de HAJEJ et al 2010, nous prenons en compte la dégradation des machines tout en prévoyant les actions de maintenance. Ainsi, la stratégie de maintenance dépend fortement de la planification de la production préalablement étudiée qui est en accord avec le principe de planification conjointe de la production et de la maintenance et la méthode intégrée adoptée.
Dans cette section, nous supposons que les actions préventives doivent être programmées à la fin d'une période de production.
nous nous sommes inspirés des recherches de HAJEJ 2017 où l'auteur ne traitait que d'une seule machine sur un horizon temporel fini, c'est pourquoi nous proposons l'expression suivante pour décrire la fonction de taux de défaillance adoptée en considérant une machine j à une période de production k:

$$\lambda_{j,k}(t) = \lambda_{j,k-1}(\Delta t) + \frac{P_{j,k}}{Pmax}\ \lambda n(t)\ ; t \in [0, \Delta t] \quad (8)$$

$\lambda n(t)$: Représente le taux de défaillance pour les conditions nominales qui correspond au taux de défaillance avec le taux de production maximal qui est modélisé avec la distribution de Weibull comme suit :

$$\lambda n(t) = \frac{\beta}{\eta}(\frac{t}{\eta})^{\beta-1} \quad (9)$$

En général, le coût de maintenance de la j^{éme} éolienne est formulé comme suit :

$$MCj = Cpm(Nj - 1) + Ccm\ \bar{Y}j(Pjk, Nj) \quad (10)$$

L'expression de la demande totale de pièces de rechange s'exprime comme suit:

$$De = nrp \times Nb + nrc \times \bar{Y}_j(P, Nb) \quad (11)$$

Où:

$$\bar{Y}j(Pj, Nj) = \sum_{j=0}^{Nb-1}\left(int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right) - int\left(j\times\frac{T}{\Delta t}\right)\times\Delta t \times \lambda_0(t_0) + \sum_{i=int\left(j\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1}^{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)} \int_0^{\Delta t}\sum_{l=1}^{i-1}\frac{P_l}{P_{max}}\times\lambda_n(\Delta t)dt + \sum_{i=int\left(j\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1}^{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)} \int_0^{\Delta t}\frac{P_i}{P_{max}}\times\lambda_n(\Delta t)dt + \int_0^{(j+1)\times T - int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)\times\Delta t}\left(\sum_{l=1}^{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)}\frac{P_l}{P_{max}}\times\lambda_n(\Delta t)\right)dt + \int_0^{(j+1)\times T - \left(int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1\right)\times\Delta t}\left(\frac{P_{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1}}{P_{max}}\times\lambda_n(t)\right)dt + \frac{P_{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)}}{P_{max}}\times\int_{int\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)\times\Delta t}^{(j+1)\times T}\lambda_n(t)dt\right) \quad (12)$$

nrc est le nombre moyen de pièces de rechange nécessaires pour une maintenance corrective. Ce nombre moyen est aléatoire et nous l'avons déterminé selon les conditions suivantes :

- Le nombre de pièces de rechange nécessaires pour chaque nrci de maintenance minimale (variable aléatoire) suit une distribution de Poisson avec une moyenne de M_D.
- Nous prenons en considération le nombre moyen de défaillances entre [0, T], $\bar{Y}j(Pj,Nj)$.
- nrc et nrci sont des entiers.

$$nrc = \frac{\sum_{i=1}^{\bar{Y}j(Pj,Nj)} nrc_i}{\bar{Y}j(Pj,Nj)} \quad (13)$$

Inspiré du modèle de Wilson, la quantité Q économique ordonnée à une périodicité fixe est:

$$Q = \sqrt{\frac{2\times C_c \times D_e}{C_{pos}}} \quad (14)$$

Ainsi, le coût total de la gestion des pièces de rechange est:

$$C\big(Q,(P,Np)\big) = C_a \times D_e(P,Nb) + C_c \times \left(\frac{D_e(P,Nb)}{Q}\right) + C_{pos} \times \left(\frac{Q}{2}\right) \quad (15)$$

Le coût total de la maintenance et de la gestion des pièces de rechange de la j^{éme} éolienne :

$$MCT_j = \frac{\left(C_a \times D_e(P,Nb) + C_c \times \left(\frac{D_e(P,Nb)}{Q}\right) + C_{pos} \times \left(\frac{Q}{2}\right)\right)}{H\times\Delta t} + \frac{(Nb\times Mp) + (\bar{Y}j(Pj,Nj)\times Mc)}{H\times\Delta t} \quad (16)$$

Le coût total des pièces de rechange et de la maintenance du parc éolien :

$$MC = \sum_{j=1}^{M_k} MCT_j \quad (17)$$

Nous calculerons le coût de maintenance correspondant à N ∈ {1...12}et Q. Le M*= (N*, Q*) correspondra au coût de maintenance et de gestion des pièces de rechange le moins cher MC*.

5 ÉTUDE DE CAS

5.1 Production

- En ce qui concerne la période de production Δt et le temps à horizon fini:

Δt =1 mois; H=60 mois;

- les coûts de stockage et de production:

C_s=6 um; C_p=3 um;

- pour a1 et a2:

a1=20;a2=0;

- Le nombre de éoliennes:

m=3; M=6;

- Paramètres de Weibull du vent:

a=2; c=10;

- Caractéristiques de l'éolienne:

Pmx=20kW; Pr=10 kW; vc=3 m/s; vf =26 m/s;
vr =10 m/s ;Hub height =15 m; Rotor diameters=8m;

- Pour le taux de service, nous effectuons ce test en considérant que Θ=90% et comme niveau de stock initial nous supposons que S0=0;

Puisque nous supposons que la demande est aléatoire et qu'elle est gaussienne avec écart-type
σ_d= 1.1 and mean μ_d=50;

- Résultats:

Après avoir effectué des tests différents et successifs avec les mêmes entrées, nous remarquons qu'en moyenne le résultat est le suivant :

Coût total			1971123 um	
K	M_k(kw)	S_k(kw)	P_k(kw)	D_k(kw)
1	6	9.98	59.98	50.04
2	5	10.88	50.89	47.78
3	6	22.60	61.73	52.82
4	4	14.62	42.02	50.57
5	6	22.14	57.52	47.78
6	3	2.89	30.75	48.84
7	6	13.46	60.57	51.87
8	5	15.11	51.65	51.24
9	6	23.87	58.76	49.86
10	4	11.50	37.63	50.50
11	5	9.97	48.48	50.47
12	6	16.57	56.60	50.27
13	4	6.17	39.60	50.41
14	5	4.35	48.18	47.80
15	5	3.01	48.66	49.49
16	6	14.20	61.19	49.60
17	6	24.51	60.32	49.88
18	6	36.13	61.62	48.08
19	3	16.45	30.32	49.44
20	6	27.95	61.50	48.72
21	6	37.71	59.76	50.65
22	6	48.81	61.10	49.61
23	5	47.50	48.69	50.31
24	4	38.59	41.09	49.12
25	6	47.41	58.81	49.91
26	6	59.16	61.75	50.70
27	6	67.82	58.66	50.33
28	4	57.71	39.89	48.25
29	3	36.62	28.91	51.25
30	6	46.27	59.65	49.34
31	5	44.24	47.97	51.32
32	6	54.65	60.40	48.27
33	4	44.27	39.63	49.54
34	6	53.53	59.26	50.23
35	6	61.97	58.44	50.82
36	6	72.18	60.21	51.43
37	5	71.67	49.49	48.42
38	5	73.92	52.25	50.38
39	5	72.11	48.20	50.24
40	6	80.20	58.09	51.26
41	3	60.62	30.42	51.95
42	4	51.17	40.55	51.28
43	6	61.81	60.64	51.45
44	6	72.79	60.98	51.01
45	4	63.83	41.04	49.30
46	4	52.71	38.88	49.85
47	5	53.34	50.63	50.07
48	4	43.42	40.08	50.62
49	6	52.02	58.60	49.00
50	6	62.43	60.41	51.46
51	6	73.79	61.36	50.79
52	6	82.61	58.81	49.91
53	6	94.31	61.71	51.48
54	6	103.80	59.49	49.52
55	5	102.41	48.61	50.81
56	5	100.12	47.71	50.00
57	4	89.40	39.27	49.55
58	3	68.49	29.09	50.67
59	4	58.03	39.54	48.67
60	6	68.35	60.32	50.41

Tableau 1:Solution approximative compte tenu des paramètres ci-dessus.

-Le coût total est relativement élevé. Cela s'explique tout d'abord par l'importance de la demande que nous avons prise en compte.
-Nous remarquons que le niveau des stocks est relativement important. Cela est lié à la contrainte du taux de service

Le tableau suivant représente l'énergie produite par chaque éolienne au cours de chaque période.(en KW) :

K	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	10.28	10.07	9.06	9.09	10.65	10.84
2	10.25	10.97	10.31	9.67	9.69	0.00
3	9.24	10.49	10.16	10.99	10.05	10.79
4	10.55	10.94	10.39	10.14	0.00	0.00
5	9.24	9.77	9.61	10.39	9.13	9.37

6	10.47	9.43	10.85	0.00	0.00	0.00
7	10.20	9.43	10.33	10.09	10.93	9.60
8	9.86	9.51	10.95	10.72	10.62	0.00
9	9.09	9.09	9.72	10.82	10.18	9.86
10	9.27	9.99	9.16	9.21	0.00	0.00
11	9.21	9.20	10.16	9.09	10.82	0.00
12	9.45	9.07	9.58	9.53	9.50	9.47
13	9.68	9.33	10.38	10.21	0.00	0.00
14	9.68	9.27	9.58	10.02	9.62	0.00
15	9.36	10.67	9.42	9.37	9.84	0.00
16	10.63	10.55	10.79	9.10	10.93	9.18
17	9.85	10.00	10.39	10.52	9.13	10.42
18	10.42	9.54	10.60	10.89	9.56	10.61
19	10.48	10.80	9.04	0.00	0.00	0.00
20	9.94	10.24	10.93	10.48	9.09	10.81
21	9.18	9.75	10.88	9.37	10.31	10.26
22	9.96	10.09	10.74	9.84	10.39	10.08
23	10.58	10.51	9.34	9.02	9.25	0.00
24	10.94	10.29	9.09	10.77	0.00	0.00
25	10.08	10.67	9.76	9.88	9.30	9.13
26	9.24	10.95	9.95	10.46	10.78	10.37
27	9.08	9.84	10.30	9.44	9.40	10.60
28	10.39	9.03	10.54	9.93	0.00	0.00
29	9.63	9.68	9.59	0.00	0.00	0.00
30	10.89	9.37	10.61	9.03	9.20	10.56
31	9.01	9.07	9.21	10.68	9.99	0.00
32	9.74	9.50	10.52	10.38	9.77	10.49
33	9.36	9.70	10.78	9.79	0.00	0.00
34	10.61	9.33	9.56	9.60	9.48	10.67
35	9.89	9.69	9.62	10.03	9.79	9.41
36	9.77	9.97	9.01	10.89	10.83	9.75
37	9.35	9.96	10.48	9.90	9.80	0.00
38	10.74	10.62	10.29	9.95	10.65	0.00
39	9.66	9.98	9.10	9.26	10.20	0.00
40	9.92	9.52	9.04	10.96	9.39	9.25
41	10.79	10.07	9.56	0.00	0.00	0.00
42	10.24	9.97	10.17	10.17	0.00	0.00
43	10.52	9.55	9.11	10.91	10.11	10.43
44	9.79	9.86	9.58	10.57	10.69	10.50
45	10.69	9.95	9.78	10.62	0.00	0.00
46	9.15	9.87	10.55	9.31	0.00	0.00
47	9.86	10.94	10.25	9.07	10.51	0.00
48	9.83	10.96	10.04	9.26	0.00	0.00
49	10.94	9.02	9.13	10.37	9.86	9.28
50	9.63	9.11	10.87	10.88	10.73	9.19
51	10.72	10.20	10.85	9.80	9.61	10.17
52	9.24	9.27	10.68	10.10	10.18	9.34
53	10.86	9.58	10.68	10.29	10.63	9.66
54	10.29	9.57	10.89	9.87	9.09	9.79
55	9.66	9.69	9.20	10.25	9.81	0.00
56	9.01	10.09	9.99	9.23	9.39	0.00
57	9.63	9.21	10.27	10.17	0.00	0.00
58	9.24	10.49	9.36	0.00	0.00	0.00
59	9.03	9.28	10.77	10.46	0.00	0.00
60	9.27	9.96	10.16	9.96	10.07	10.91

Tableau 2 : Énergie produite par chaque éolienne.

5.2 Maintenance

Les données d'entrée *:*

Input data			
Cmp=100 mu;	**Nrp=40;**	**B=100;**	**Cc=50 mu;**
Ccm=2500mu;	**Nrc=20;**	**α=2;**	**Cpos=10 mu;**
λ_0=0 ;	**Ca=5 mu;**	*T*= H/N ;	

Tableau 3 :Données numériques

L'énergie produite par chaque éolienne de chaque période (Pj,k) est indiquée dans le tableau 2.

- Résultats:

	MC*	N*	Q*	De
Éolienne1	10185.57	4	42	167
Éolienne2	10187.3	4	41	168
Éolienne3	10183.8	4	41	167
Éolienne4	10202.9	4	40	166
Éolienne5	9774.61	3	36	127
Éolienne6	9500.76	2	29	86

Tableau 4 :Planification de la maintenance

6 CONCLUSION

Améliorer la rentabilité des parcs éoliens et assurer leur durabilité dans le temps est l'objectif principal dans un marché croissant qui devient de plus en plus exigeant et compétitif. Tout en s'efforçant d'atteindre ces objectifs au moindre coût, les gestionnaires ont toujours été confrontés à divers problèmes, qu'il s'agisse de problèmes de planification ou de gestion des ressources.

Nous commençons par proposer une solution pour optimiser les coûts de production sous des contraintes liées notamment au taux de service. Pour ce faire, nous développons avec Matlab un algorithme basé sur le principe de la méthode d'exploration aléatoire. Cette combinaison obtenue a ensuite été considérée comme une donnée d'entrée pour effectuer la maintenance et la gestion des pièces de

rechange. Pour ce faire, nous proposons un algorithme développé sur Mathematica pour organiser les actions de maintenance sur un horizon temporel fini, en tenant compte de la dégradation de chaque machine dans le temps et le taux de production.
Pour poursuivre ce travail et l'améliorer, nous pouvons supposer que des actions préventives peuvent être menées au milieu d'une période de production et pas seulement à la fin. De plus, nous pouvons utiliser la maintenance mixte pour avoir une optimisation entre le coût des maintenances et la disponibilité de nos éoliennes.

REFERENCES

Aghazzaf and Najid (2008*). Integrated production and preventive maintenance in production systems subject to random failures*. European journal of operational research, 178:3382-3392.

Abdelrahim, E. H., & Vizvári, B. (2016). Simultaneous Scheduling of Production and Preventive Maintenance on a Single Machine. Arabian Journal for Science and Engineering, 42(7), 2867–2883. doi:10.1007/s13369-016-2290-4.

Carta, J.; Ramłrez, P.; Velzquez, S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the canary islands. Renew. Sustain. Energy Rev. 2009, 13, 933–955.

Dellagi, S., Trabelsi, W., Hajej, Z., & Rezg, N. (2020). Integrated maintenance/spare parts management for manufacturing system according to variable production rate impacting the system degradation. Concurrent Engineering, 1063293X1989873. doi:10.1177/1063293x19898734

Hajej (2010*). Contribution to the development of integrated maintenance policies with consideration of the right of retraction and remanufacturing*. PhD thesis, Paul Verlaine University-Metz.

Hajej et al (2017). *An integrated maintenance strategy for a power generation system in the event of a change in the failure rate (case of a wind turbine)*. Conference: 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) DOI: 10.1109/ICRERA.2017.8191175.

Huang et al (2008). *Modeling and analyzing a joint optimization policy of block replacement and spare inventory with random lead time*, IEEE Transactions on Reliability, 57(1), 113-124.

PORTRAIT CONCEPTUEL DE LA GESTION DE L'ÉNERGIE DANS LES SYSTÈMES DE PRODUCTION

Thomas A. HERNÁNDEZ, Nadia LEHOUX, Louis GOSSELIN

Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Québec, Canada
thomas-antonio.hernandez-gutierrez.1@ulaval.ca, Nadia.Lehoux@gmc.ulaval.ca, Louis.Gosselin@gmc.ulaval.ca

RÉSUMÉ : *Pour faire face aux problèmes énergétiques industriels actuels qui prennent de plus en plus d'importance, les organisations doivent définir des stratégies énergétiques propulsant l'industrie vers un développement plus durable. Dans ce contexte, la mise en œuvre d'un système de gestion de l'énergie permet non seulement de réduire les coûts, mais aussi de protéger l'environnement, de préserver les ressources et de réduire l'empreinte carbone. Cet article relie à travers une image conceptuelle, les principaux axes de référence de la gestion de l'énergie trouvés dans la littérature. Une revue de la littérature a d'abord permis de déterminer qu'un système de gestion de l'énergie se base sur trois aspects primordiaux : le niveau de maturité énergétique d'une entreprise, la structure organisationnelle qui soutient l'implantation du système énergétique et les phases nécessaires pour gérer la performance énergétique des systèmes de production. Le regroupement de tous ces éléments a ensuite permis d'analyser leur importance et la manière dont l'un influence l'autre. Le portrait final présente l'image complète des éléments clés devant être présents dans un système de gestion de l'énergie.*

MOTS-CLÉS : *Gestion de l'énergie, développement durable, systèmes de production, cadre de gestion de l'énergie.*

1 INTRODUCTION

Ces dernières années, les problèmes énergétiques liés aux changements climatiques, à la rareté des ressources et aux sources d'approvisionnement en énergie ont fait évoluer les attitudes de la société et de l'industrie en faveur de la protection de l'environnement (May *et al*., 2017). Tandis que les ressources consommées et les déchets résultant de la production affectent l'environnement à diverses échelles, les systèmes manufacturiers continueront d'être un pilier important de l'économie mondiale et, par conséquent, ils doivent exercer davantage de pression sur leurs processus et systèmes de fabrication pour garantir la protection de l'environnement et de la planète (Duflou *et al*., 2012).

Au fil du temps, la demande de biens a augmenté et, en conséquence, la demande de ressources naturelles et d'énergie a accru abruptement. La transition vers le développement durable nécessite des stratégies qui accroissent l'efficience des opérations et des processus en mettant en œuvre des méthodes de production moins énergivores. Pour ce faire, les stratégies de fabrication doivent évoluer du « profit maximum avec un capital minimum » au « profit maximum avec un minimum de ressources » (IEA, 2007). À cet égard, l'analyse de la consommation d'énergie et de son utilisation doit faire partie de stratégies exhaustives d'amélioration continue pour favoriser la détection des pertes énergétiques.

La gestion énergétique (GE) industrielle vise ainsi à augmenter l'efficience énergétique dans les processus de production. Elle devient une priorité considérable en raison de trois facteurs importants qui motivent la mise en œuvre des systèmes de GE : la hausse des prix de l'énergie, les nouvelles réglementations environnementales sur les émissions de CO_2 et une sensibilisation des clients aux produits énergétiques durables (Bunse *et al*., 2011; May *et al*., 2017). De ce fait, l'industrie 4.0 qui se trouve en pleine transition vers la création de valeur industrielle durable (Carvalho *et al*., 2018), offre la possibilité d'atteindre cette création de valeur à travers les trois principaux piliers de la durabilité : environnemental, social et économique (Stock et Seliger, 2016).

Traditionnellement, comme l'illustrent Schönsleben (2007) et Chryssolouris (2006), les performances d'un système de production étaient évaluées en surveillant quatre attributs : le coût, le temps, la qualité et la flexibilité. Néanmoins, aucun ne tenait compte de l'efficience énergétique ou des dimensions essentielles à la durabilité. Toutefois, selon Bunse *et al*. (2011), en raison des impacts environnementaux et économiques importants associés à la consommation d'énergie, l'efficience énergétique doit être considérée au même titre que les attributs conventionnels. Similairement, Salonitis et Ball (2013) proposent d'étendre le tétraèdre de fabrication proposé par Chryssolouris (2006) pour inclure la « durabilité » comme nouveau moteur de fabrication puisque les processus de production devraient optimiser leur consommation d'énergie pour réduire les pertes énergétiques et l'utilisation des ressources.

L'objectif de cet article vise donc à analyser les éléments devant constituer un système de GE et de quelle façon ils

sont liés entre eux. Pour ce faire, une revue de la littérature a d'abord été menée, afin de mieux comprendre ce que sont les systèmes de GE et leur rôle au sein des systèmes de production. L'analyse de la littérature a ensuite permis de dégager un cadre conceptuel explicitant les éléments clés devant constituer un système de GE et leur interdépendance. L'article vise ainsi à proposer un système de GE pouvant agir comme mécanisme de support et de création de valeur durable dans une organisation afin d'améliorer sa performance énergétique.

Cet article scientifique décrit, à la section 2, la méthodologie de recherche qui a permis d'explorer, rassembler, organiser et évaluer la littérature pertinente sur la GE dans les systèmes de production. À la section 3, cette classification dévoile le portrait conceptuel des éléments clés des systèmes énergétiques. Il est complété par une conclusion.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'état de l'art effectué dans cette recherche a permis d'identifier les principaux cadres de GE présents dans l'industrie et d'examiner différentes méthodologies et modèles de gestion visant à améliorer l'efficience énergétique dans les systèmes de production.

2.1 Méthodologie de la recherche

Afin d'effectuer une interprétation itérative du sujet et de garder une flexibilité pour creuser la revue scientifique, le cercle herméneutique a guidé la stratégie de recherche. Les bases de données bibliographiques *Engineering Village* et *Web of Science* ont servi de support pour effectuer la revue scientifique. Ensuite, les bases de données textuelles comme *ScienceDirect*, *SpringerLink* et *IEEE Xplore* ont été exploitées pour pousser plus loin certains aspects particuliers de l'étude. L'équation de recherche a été définie comme suit : ("*energy management*" or "*energy management framework*" or "*energy efficien**") and "*manufacturing*" and "*sustainable development*". Dans la phase de collecte des données, l'étude a tenu compte des articles publiés de 2010 à 2019. Cependant, les références pertinentes citées dans ces articles, même datant des années précédentes, ont également été prises en compte. Les critères de sélection ont permis de conserver les articles abordant la GE comme sujet principal ou encore ceux se concentrant sur l'intégration énergétique dans les systèmes de production. Cette analyse a permis de discerner les concepts importants liés à la GE et a également orienté la recherche vers les trois principaux axes de référence de GE étudiés dans cet article : la GE dans les systèmes de production, l'intégration de la GE dans la structure organisationnelle et les modèles de maturité de la GE.

2.2 Systèmes de GE

Dans la littérature étudiée, la GE prend différentes définitions. D'après Field et Safari (2019), la GE englobe plusieurs approches où le contrôle des émissions polluantes est aussi important que la préservation des ressources. Plus précisément, la norme ISO 50001 (ISO, 2018), qui concerne les systèmes de GE, établit que les objectifs de la GE résident dans l'amélioration de la performance énergétique d'une organisation. Autrement dit, cela implique de mieux gérer la consommation d'énergie pour améliorer la productivité, réduire l'empreinte carbone et éliminer les coûts associés au gaspillage énergétique. Dans leur étude des écarts entre les besoins de l'industrie et la littérature scientifique, Bunse *et al.* (2011) précisent que la GE est constituée de différentes phases où l'efficience énergétique des systèmes de production doit être mesurée, surveillée et constamment évaluée. De leur côté, May *et al*. (2017) étendent cette définition en disant que la GE couvre également différents niveaux hiérarchiques opérationnels dans une usine de fabrication (c'est-à-dire les outils, l'équipement, les postes de travail, etc.). Ainsi, mesurer la performance énergétique à différents niveaux est nécessaire pour mettre en œuvre une stratégie de GE dans les systèmes de production (May *et al*., 2013).

Chacune des phases de la GE permet aux décideurs d'identifier les opportunités d'amélioration dans le système énergétique et de suivre les effets de leurs décisions sur la consommation d'énergie (May *et al*., 2017). Selon Gopalakrishnan *et al.* (2014), un système de GE est un instrument qui précise les objectifs et les politiques énergétiques à cibler, les procédures et les plans d'action à suivre, ainsi que les processus d'amélioration continue. Suivant les principes de la norme ISO 50001, Menghi *et al*. (2019) ont analysé différents outils et méthodes pour évaluer l'efficience énergétique dans les systèmes de production selon trois groupes : l'analyse énergétique, l'évaluation énergétique et les mesures d'économie d'énergie. Il semble également exister des cadres axés sur la construction de la structure organisationnelle où les fonctions et les rôles des parties impliquées dans le système énergétique sont définis (voir Gordić *et al*., 2010; Javied *et al*., 2019). Finalement, il existe des outils pour évaluer le niveau de maturité énergétique des entreprises (voir Introna *et al*., 2014; Jovanović et Filipović, 2016).

2.3 GE dans les systèmes de production

La GE dans les systèmes de production est composée de plusieurs éléments clés nécessaires pour pouvoir intégrer l'efficience énergétique dans les opérations d'une entreprise. Cinq thèmes importants sont ressortis de l'analyse de la littérature : les moteurs de changement et les barrières, la mesure de l'efficience énergétique, les systèmes de contrôle, l'évaluation de l'amélioration de l'efficience énergétique et les leviers. La Figure 1 illustre les éléments clés de la GE dans les systèmes de production. Chaque élément est brièvement expliqué ci-dessous.

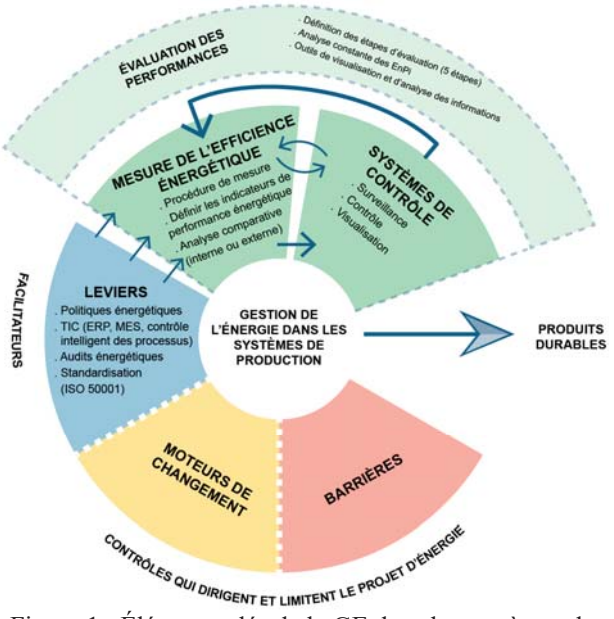


Figure 1 : Éléments clés de la GE dans les systèmes de production

2.3.1 Les moteurs de changement et les barrières

Les moteurs de changement mettent en évidence les motivations des entreprises pour améliorer l'efficience énergétique, grâce à l'adoption de meilleures pratiques, services et technologies énergétiquement efficaces. Ceux-ci influencent aussi l'organisation et la prise de décisions pour faire face aux barrières existantes qui entravent la transition énergétique (Trianni *et al*., 2016). Selon les auteurs, les moteurs de changement peuvent être classés en quatre catégories : réglementaires, économiques, d'information et de formation. D'un autre côté, les barrières ralentissent et limitent le mouvement des entreprises cherchant à améliorer l'efficience énergétique de leurs opérations. Cagno *et al*. (2013) ont développé une taxonomie dans laquelle l'origine de la barrière par rapport à l'entreprise peut être interne ou externe. Les auteurs ont présenté une liste de 27 barrières classées dans les catégories suivantes : économiques, comportementales, manque de sensibilisation, liées aux compétences, information, organisation et technologie. Par conséquent, avant de mener des projets d'efficience énergétique dans les usines de production, l'identification et l'évaluation des moteurs de changement et des barrières semble essentielle afin d'avoir des systèmes de production moins énergivores et des politiques énergétiques réussies (May *et al*., 2017).

2.3.2 Mesure de l'efficience énergétique

La mesure de l'efficience énergétique est la base pour contrôler la consommation d'énergie dans les processus de production, ce qui permet d'établir des décisions d'amélioration en fonction de ce qui a été observé et d'identifier les potentiels d'optimisation grâce à une surveillance constante de l'efficience énergétique (Bunse *et al*., 2011). Actuellement, la mesure des données énergétiques peut aller d'une mesure manuelle à des systèmes de mesure entièrement automatisés. D'après Dörr *et al*. (2013), la procédure de mesure commence par la définition et l'évaluation de la situation réelle, puis le plan d'action d'amélioration est ensuite défini. Dans le même ordre d'idées, Thiede *et al*. (2012) ont proposé d'évaluer et de mesurer la consommation d'énergie d'une entreprise en dressant un portfolio de chaque équipement en termes de puissance, de temps de fonctionnement et de consommation d'énergie estimée. La génération de données crée un aperçu de la consommation d'énergie et permet de déterminer les indicateurs de performance (Dörr *et al*., 2013) nécessaires pour évaluer et suivre la performance des systèmes énergétiques (May *et al*., 2017). La norme ISO 50001 (ISO, 2018) les définit comme des indicateurs de performance énergétique (EnPI). Les EnPI peuvent différer d'une entreprise à l'autre et peuvent ensuite être utilisés pour l'analyse comparative et le contrôle de la consommation d'énergie des entreprises (Javied *et al*., 2015). Cette analyse comparative peut être utilisée au sein des entreprises pour évaluer périodiquement les progrès de la GE dans les systèmes de production ou à l'externe avec d'autres entreprises qui ont des processus et machines similaires, afin de comparer la performance énergétique des opérations et des équipements (Kent, 2018).

2.3.3 Systèmes de contrôle

La surveillance de l'efficience énergétique semble par ailleurs nécessaire pour atteindre une meilleure GE dans les systèmes de production, puisqu'elle permet aux décideurs de voir les possibilités d'amélioration, de surveiller l'utilisation de l'énergie et d'observer les résultats de leurs décisions. Par conséquent, dans cette phase, les gestionnaires peuvent déterminer si les objectifs énergétiques sont atteignables ou non (May *et al*., 2013) et identifier les processus les plus énergivores (Bunse *et al*., 2011). De ce point de vue, les principaux consommateurs d'énergie industriels, qu'ils soient électriques, thermiques, chimiques ou mécaniques, doivent être identifiés, suivis et analysés en temps réel, afin d'augmenter l'efficience énergétique dans les systèmes de production. Pour ce faire, Vikhorev *et al*. (2013) proposent un cadre de GE qui permet de surveiller la performance énergétique à tous les niveaux d'un système de production, alors que Vijayaraghavan et Dornfeld (2010) offrent une approche qui permet une surveillance de l'énergie à tous les niveaux d'une organisation. Enfin, Hopf et Müller (2015) ont proposé une approche de gestion visuelle basée sur des cartes de données énergétiques pour visualiser la consommation d'énergie des systèmes industriels.

2.3.4 Évaluation des performances

Pour mener à bien l'évaluation des performances, cinq étapes clés doivent être considérées : surveillance, mesure, analyse et évaluation, audit interne et revue de gestion (ISO, 2018). Les actions que les entreprises déploient pour superviser les trois premières étapes peuvent être simples ou très complexes selon la taille de chaque organisation et la configuration de chaque processus. D'autre part, l'audit interne est un levier qui assure que le système de GE se conforme aux exigences et

objectifs de l'organisation, ainsi qu'aux normes applicables (e.g. ISO 50001). La revue de gestion détermine si le système de GE reste efficace et évalue si les objectifs établis doivent être modifiés (Field et Safari, 2019) ou s'il est nécessaire de lancer des actions correctives et préventives. Avec la génération de données de consommation d'énergie, l'utilisation d'indicateurs de performance énergétique et les outils de visualisation et d'analyse des informations, la base de référence pour évaluer la performance énergétique des processus est alors établie (Dörr *et al.*, 2013).

2.3.5 Leviers

Les leviers soutiennent le système de GE, car ils accélèrent et facilitent la transition des organisations vers une production plus durable d'un point de vue énergétique. Les leviers peuvent être des supports importants au niveau stratégique dans la phase de planification et au niveau opérationnel dans les processus de contrôle, de mesure et d'évaluation de la performance énergétique. Premièrement, les politiques énergétiques élaborées par la haute direction aident à définir des objectifs et des cibles énergétiques qui visent à améliorer la consommation d'énergie, à réduire les émissions environnementales et à réduire les coûts. Ensuite, les audits énergétiques assurent que le système de GE suit les objectifs et les buts établis (Gopalakrishnan *et al.*, 2014) et identifient les domaines où des améliorations sont nécessaires et où les objectifs n'ont pas été atteints. Un troisième levier, la norme ISO 50001, est conçue pour obtenir des résultats mesurables en matière d'efficience énergétique et de consommation d'énergie, dans le but d'améliorer la performance énergétique d'une organisation (ISO, 2018). Finalement, les technologies de l'information et de la communication (TIC) aident à réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre grâce à la mesure et au contrôle en temps réel du comportement énergétique (Vikhorev *et al.*, 2013; May *et al.*, 2017). En plus, ceux-ci facilitent l'évaluation de la performance de l'efficience énergétique, ce qui génère un meilleur contrôle des processus (May *et al.*, 2013).

2.4 Intégration énergétique dans la structure organisationnelle

Un système de GE efficient implique un cadre organisationnel clair et bien défini dès le départ (Dörr *et al.*, 2013). Un tel cadre dépend de différents facteurs tels que la taille de l'entreprise, le type de secteur industriel, le nombre d'employés, les différents types d'énergie utilisés, etc. (Gordić *et al.*, 2010). Le poste de gestionnaire de l'énergie est crucial, car il aura un rôle de facilitateur, de conseiller, d'expert et de gestionnaire de projets énergétiques (Kent, 2018). Cela étant dit, la définition de la structure interne est un élément clé dans la formation des cadres organisationnels de l'énergie, car dans cette première étape, les dirigeants sont choisis, les responsabilités sont déléguées, les départements sont formés et les tâches sont définies pour les personnes qui seront impliquées (Javied *et al.*, 2019).

2.5 Modèles de maturité de la GE

Lors de la mise en œuvre d'un plan stratégique, il est difficile de déterminer la portée des objectifs si l'état initial de la situation est inconnu. La connaissance de la position de l'entreprise par rapport à ses problèmes les plus représentatifs permettra à la haute direction de déployer des plans d'action efficaces et bien orientés. Dans ce contexte, les modèles de maturité énergétiques d'après Introna *et al.* (2014) permettent à toute entreprise d'évaluer facilement et de manière indépendante son niveau de maturité énergétique. Cette évaluation permet aussi de créer un premier schéma de la situation actuelle de l'entreprise et de déterminer le point de départ du plan de GE. De même, du point de vue des auteurs, la maturité dans le domaine de la GE dépend des bonnes pratiques énergétiques de chaque entreprise, des technologies durables employées et de la façon dont chaque entreprise gère ses besoins énergétiques. À cet égard, Introna *et al.* (2014) ont développé un modèle de maturité qui analyse les enjeux clés de la gestion de la consommation d'énergie, conformément à la norme ISO 50001. Cependant, il existe d'autres modèles avec des approches, des dimensions et des structures différentes (voir Jovanović et Filipović, 2016; Kent, 2018).

3 PORTRAIT DE LA GE

Les ressources financières nécessaires pour obtenir une certification ou pour embaucher des consultants externes qui aident à définir la base de la structure énergétique d'une organisation, peuvent être des barrières économiques, surtout pour les petites et moyennes entreprises (Bunse *et al.*, 2011). Pour cette raison, il ne faut pas oublier qu'un système de GE peut être basé sur la norme ISO 50001 ou il peut s'agir d'un système interne conçu par n'importe quelle entreprise (Kent, 2018; Field et Safari, 2019). Ainsi, dans cette section, les trois principaux axes qui ont émergé de la revue de littérature sont liés dans une image conceptuelle illustrant les principaux piliers d'un système de GE dans les systèmes de production. La Figure 2 montre les principales caractéristiques de chaque élément et la manière dont ils sont interreliés.

La première dimension de l'image conceptuelle correspond à l'évaluation initiale du degré de maturité des entreprises. La relation qu'elle entretient avec les deux autres dimensions est directe, car la connaissance de la magnitude des problèmes permettra de déterminer les ressources, les outils, les procédures et le personnel nécessaires pour mettre de l'avant le plan d'action. En d'autres mots, le niveau de développement de chacun des éléments clés de la GE sera crucial pour la croissance efficiente de l'organisation (Introna *et al.*, 2014).

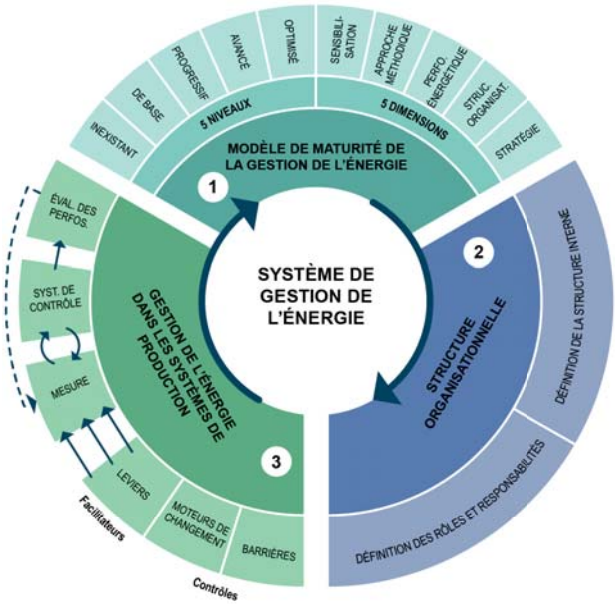


Figure 2 : Portrait conceptuel d'un système de GE

Par ailleurs, la dimension de la structure organisationnelle est fondamentale dans ce cycle, car les équipes construites pour faire face aux enjeux énergétiques doivent partager la vision de leurs dirigeants et posséder les outils nécessaires leur permettant de mesurer, contrôler, évaluer et mettre en œuvre avec succès le système de GE. La formation, les compétences et les qualités de chaque membre de l'équipe contribueront en synergie à l'amélioration de la performance énergétique de l'organisation (Kent, 2018) et de son niveau de maturité. De même, sans l'existence d'un système d'information (structures TIC) permettant de visualiser avec précision les informations critiques et essentielles des opérations, la structure organisationnelle sera inefficiente (Dörr *et al*., 2013). Pour cette raison, une rétroaction constante à tous les niveaux organisationnels permettra de suivre de près les résultats de chaque élément du système de GE. Enfin, au cœur de la troisième dimension se trouvent les éléments clés qui permettent d'améliorer la performance énergétique des systèmes de production d'une entreprise. Premièrement, les moteurs de changement et les barrières stimuleront ou ralentiront le niveau de maturité organisationnelle. La mesure de l'efficience énergétique permettra une visualisation transparente des flux énergétiques au sein des opérations (Richert, 2017) et aidera à identifier des secteurs pouvant être optimisés (May *et al*., 2017) grâce à l'utilisation des EnPIs qui fourniront des informations périodiques sur la performance énergétique des processus (Gopalakrishnan *et al*., 2014). D'autre part, les systèmes de contrôle et de surveillance aideront à identifier les processus les plus énergivores à travers différentes interfaces graphiques (Vikhorev *et al*., 2013) montrant la consommation d'énergie en temps réel grâce à l'utilisation de dispositifs et de capteurs intelligents (May *et al*., 2013). Ces systèmes permettront de comprendre les profils d'utilisation de l'énergie et de réduire son utilisation dans les processus de fabrication (Vijayaraghavan et Dornfeld, 2010). De même, l'assurance d'une performance énergétique optimale sera seulement possible en tenant compte des méthodes appropriées d'évaluation (Bunse *et al*., 2011) et de la participation active de toute l'équipe. Finalement, les leviers, en tant que mécanismes de poussée, amélioreront la croissance et la performance de l'ensemble du système de GE à tous les niveaux organisationnels. En l'absence de l'un de ces éléments, il est fort probable que les changements énergétiques ne perdureront pas ou ne génèreront pas les résultats escomptés.

4 CONCLUSION

Pour atteindre les cibles mondiales en matière de développement durable et pour combattre efficacement les problèmes énergétiques actuels, les organisations sont tenues de neutraliser l'utilisation inefficiente de l'énergie dans leurs opérations à travers de bonnes pratiques qui génèrent une valeur industrielle durable. Ainsi, elles doivent restructurer leur culture organisationnelle et l'ériger sur les dimensions de la durabilité pour rentabiliser la consommation d'énergie. Dans ce contexte, les systèmes de GE dans les processus de production sont des propulseurs de changement qui permettent d'augmenter l'efficience énergétique des opérations, de préserver les ressources et de réduire l'empreinte carbone. Le travail mené dans cette recherche a exploré la littérature dans le but d'identifier et de lier, dans une image conceptuelle, les éléments clés de la GE dans les systèmes de production. La revue de littérature a révélé qu'un système de GE se développe en plusieurs étapes. La première étape identifie à travers une analyse de maturité initiale l'amplitude du problème énergétique et aide les décideurs à définir les ressources, les outils et le personnel à déployer pour mener à bien les plans d'action. La seconde étape aborde la structure organisationnelle qui doit être construite en fonction de l'envergure des objectifs énergétiques de l'organisation, de sa taille et des ressources disponibles. La dernière étape se centralise sur la mesure, le contrôle, l'évaluation et la mise en œuvre du système de GE. Les trois étapes fournissent aux organisations un cadre de GE montrant les dimensions sur lesquelles elles doivent travailler pour améliorer la performance énergétique de leurs opérations. De même, l'applicabilité du portrait énergétique dépendra de divers facteurs clés de succès tels que les stratégies énergétiques à court, moyen et long terme, l'existence d'une unité de gestion de l'énergie, le suivi de la performance énergétique des opérations ainsi que des audits énergétiques. La présence de tels facteurs tout au long du processus de mise en œuvre du système de GE peut ainsi faciliter l'atteinte des objectifs énergétiques des organisations.

Dans une recherche future, il serait intéressant d'étudier l'évolution de la maturité énergétique d'une entreprise par rapport à la dimension de la structure organisationnelle, étant donné que la participation active de toutes les personnes impliquées dans le processus de changement favorise la croissance énergétique progressive de l'organisation. Nonobstant, la mise en œuvre de tout système énergétique commençant par l'approbation de la haute

direction d'une entreprise, le leadership des décideurs et leur motivation à vouloir changer les choses semble la véritable clé du progrès.

RÉFÉRENCES

Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brülhart, M., & Ernst, F. O. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. Journal of Cleaner Production, 19(6-7), 667-679.

Cagno, E., Worrell, E., Trianni, A., & Pugliese, G. (2013). A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 290-308.

Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E., & Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing. Procedia Manufacturing, 21, 671-678.

Chryssolouris, E. L. K. E. (2006). Manufacturing Systems: Theory and Practice. Springer-Verlag New York, XXVI, 606.

Dörr, M., Wahren, S., & Bauernhansl, T. (2013). Methodology for Energy Efficiency on Process Level. Procedia CIRP, 7, 652-657.

Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Kellens, K. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. CIRP Annals, 61(2), 587-609.

Field, A., & Safari, a. O. R. M. C. (2019). - ISO 50001 - A strategic guide to establishing an energy management system.

Gopalakrishnan, B., Ramamoorthy, K., Crowe, E., Chaudhari, S., & Latif, H. (2014). A structured approach for facilitating the implementation of ISO 50001 standard in the manufacturing sector. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 7, 154-165.

Gordić, D., Babić, M., Jovičić, N., Šušteršič, V., Končalović, D., & Jelić, D. (2010). Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. Energy Conversion and Management, 51(12), 2783-2790.

Hopf, H., & Müller, E. (2015). Providing energy data and information for sustainable manufacturing systems by Energy Cards. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 36, 76-83.

Introna, V., Cesarotti, V., Benedetti, M., Biagiotti, S., & Rotunno, R. (2014). Energy Management Maturity Model: an organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies. Journal of Cleaner Production, 83, 108-117.

IEA 2007. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 emission.

ISO. (2018). ISO 50001: 2018, Energy management systems.

Javied, T., Deutsch, M., & Franke, J. (2019). A model for integrating energy management in lean production. Procedia CIRP, 84, 357-361.

Javied, T., Rackow, T., & Franke, J. (2015). Implementing Energy Management System to Increase Energy Efficiency in Manufacturing Companies. Procedia CIRP, 26, 156-161.

Jovanović, B., & Filipović, J. (2016). ISO 50001 standard-based energy management maturity model – proposal and validation in industry. Journal of Cleaner Production, 112, 2744-2755.

Kent, R. (2018). Introduction to energy management. In Energy Management in Plastics Processing (pp. 3-32).

May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Kiritsis, D. (2017). Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. Journal of Cleaner Production, 167, 1464-1489.

May, G., Taisch, M., & Kelly, D. (2013). Enhanced Energy Management in Manufacturing through Systems Integration. In 39th Annual Conference of the Ieee Industrial Electronics Society (pp. 7525-7530). New York: Ieee.

Menghi, R., Papetti, A., Germani, M., & Marconi, M. (2019). Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools. Journal of Cleaner Production, 240.

Richert, M. (2017). An energy management framework tailor-made for SMEs: Case study of a German car company. Journal of Cleaner Production, 164, 221-229.

Salonitis, K., & Ball, P. (2013). Energy Efficient Manufacturing from Machine Tools to Manufacturing Systems. Procedia CIRP, 7, 634-639.

Schönsleben, P., 2007. Integral Logistics Management. Operations and Supply Chain Management in Comprehensive Value-added Networks, third ed. Auerbach, Boca Raton, FL.

Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. Procedia CIRP, 40, 536-541.

Thiede, S., Bogdanski, G., & Herrmann, C. (2012). A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies. Procedia CIRP, 2, 28-33.

Trianni, A., Cagno, E., Marchesani, F., & Spallina, G. (2016). Classification of drivers for industrial energy efficiency and their effect on the barriers affecting the investment decision-making process. Energy Efficiency, 10(1), 199-215.

Vijayaraghavan, A., & Dornfeld, D. (2010). Automated energy monitoring of machine tools. CIRP Annals, 59(1), 21-24.

Vikhorev, K., Greenough, R., & Brown, N. (2013). An advanced energy management framework to promote energy awareness. Journal of Cleaner Production, 43, 103-112.

Smart Ports Design Features Analysis: A Systematic Literature Review

Bessid S., Zouari A., Frikha A.
OLID Laboratory –ISGIS
University of Sfax
Sfax, Tunisia
bessidsahbia.91@gmail.com, ala.zouari@isgis.usf.tn
ahmed.frikha@isgis.usf.tn

A. Benabdelhafid
Universiapolis Agadir, Maroc
Université du Havre France
abdellatif.benabdelhafid@univ-lehavre.fr

ABSTRACT: *Ports and port areas' (the hinterland and the logistics corridors) development involves innovative technological solutions. These solutions are at both levels of instrumentation and information systems : instrumentation that has become highly communicating (sensors, RFID, Internet of Things, etc.) and new information systems integrating the complexity of large amounts of data (the Big Data and its semantic processing for detection and machine learning). In this framework, this article aims first at highlighting the Smart concept, second at presenting a modeling a smart port concept by determining its main activities as well as the essential elements that lead to the success of each activity. Third at presenting a systematic literature review specifying the activities, tools, technologies, software and offers research tracks related to smart ports, this is done through a littérature review analysis of more than 50 articles published during the (2003-2020).*

Our objectives are to move from traditional port supply chains (port of Rades, TUNIS "Who suffers from problems in using modern technology") to smart ports in order to make informed decisions. and optimize logistics and transport processes. However, the integration of the IOT into the port infrastructure requires new technologies (sensors, wireless communications, cloud computing, etc.) to ensure the reliability of the connected system.

KEYWORDS: *Smart concept, Smart port, smart port modeling, systematic literature review*

1 INTRODUCTION

The volatility of the last decade's economic condition and the increase in global competitiveness have led to strong innovation trends, particularly among developed countries. However, the integration of communication and information technology in the port's infrastructure has required new technological solutions such as the Internet of Things and Big Data, which create development opportunities, not only for the sector, but also contribute to the development of the management of port chain activities.

The term "intelligence" had existed since the dawn of humanity. Intelligence, according to the theory of Franz E Weinert (Stampfli and Collaros, 2010), is divided into 50% of genetic disposition, 25% of environmental factors and 25% of factors related to personality. Intelligence remains a delicate subject tackled in the vast field, it varies according to times, cultures and fields of application, among others.

This paper is articulated around 4 sections. Section I presents an overview of Smart concept and the modeling of the concept of intelligent port by determining its main activities. Section II presents background and taxonomy of smart concept. Section III and IV introduce smart ports and the essential elements for the success of its activities. Section V presents a review specifying some attributes and suggested lines of research related to smart ports. The paper will be summarized with concluding remarks.

2 BACKGROUND AND TAXONOMY OF SMART CONCEPT

Currently, the term "Smart" is at the center of research concerns: different studies aim to track, monitor and predict the evolution of technology of such terms as 'smart grid'. The smart grid can be considered as a modern power grid infrastructure for increased efficiency and reliability through automated control, high power converters, modern communication infrastructure, sensing and counting technologies and modern energy management techniques

Based on optimization of demand, energy and consumption (Gungor et al., 2011). According to (Petrlic, 2010) and (Lund et al., 2017), the smart grid is considered the greatest technological invention.

(Postráneckỳ and Svítek, 2017) defined smart City is as: "The concept of smart city appears because of the mobilization of populations in the cities". In addition, a smart city can be considered as a contextualized interaction between technological innovation, managerial and organizational innovation and political innovation (Nam

and Pardo, 2011). In the same vein, (Su et al., 2011), (Qin et al., 2010) and (Hall et al., 2000) have defined "smart city" as the use of information and communication technologies to detect, analyze and integrate key information from the central systems of cities in activity. Indeed, in smart systems, most electronic devices will communicate with the basic system of the software and, in this way, they will allow the user to access the information where the user is and at any time, (Arsan, 2016). Furthermore, 'Smart Logistics' is a key approach for a more efficient organization of physical logistics and information logistics in cross-society and international transport chains and networks. It integrates existing logistics technologies, such as material handling systems, and enables them to respond and act accordingly, (Uckelmann., 2008), (Oonk et al., 2013). Hence, Intelligent Logistics uses Internet of Things (IoT) integrated technologies, such as Smart Contracts, Machine Learning, Wireless Sensor Network (WSN) and Big Data based on the Blockchain in order to improve the traceability of logistics processes in real time, (Arumugam et al., 2018).

In recent years, many coastal countries, have actively started building smart ports and have achieved significant results. Smart ports in the port chain are inevitably indispensable for a fast, flexible and collaborative response to customer demand. Therefore, facing the changing environment of the port chain, the application of IoT technology to the intelligent management of the port chain to build the port chain of happiness becomes the development trend of modern companies (Xisong et al., 2013).

3 SMART PORTS

3.1 The complexity of the port chain

Modern technological systems include a societal component due to the impact of users. These systems are said to be complex when there are subsystems whose actors have divergent or even opposing objectives. Considered as an evolution of today's intelligent port platform, the Smart port is a perfect example of a complex system. This term refers in particular to an optimized port platform integrating the behavior and actions of users. According to (Beugin, 2006) a system is said to be complex when the relationships linking the components are multiple, interdependent and looped. In the same aspect, (Guérard, 2014) asserts that the science of complex systems studies systems with many components by nature independent, highly interconnected and interacting. Next, (Bittencourt et al., 2016) presented a complex model as an emergent phenomenon resulting from interactions within a network of determinants; methodological implications of using a complex systemic approach and the application of a complex model. We say that a complex system is "A system that involves many interacting agents whose aggregated behaviors must be understood.

Smart ports have many properties common to complex systems such as the heterogeneity of the elements, the impact of internal and external factors on port management and the need for a measurement and control tool to solve the problem of behavior and dynamics at any scale. In addition, they interact with their environment. The complexity of the port systems remains a vague and subjective notion, it characterizes the systems whose mastery of design, maintenance and evolution pose significant problems, related to their size and the number of technologies used, which makes the whole difficult to apprehend. In this instance, complex port systems are being distinguished from other technically complicated systems.

Modern technological systems include a societal component due to the impact of users. These systems are said to be complex when there are subsystems whose actors have divergent or even opposing objectives. Considered as an evolution of today's intelligent port platform, the Smart port is a perfect example of a complex system. This term refers in particular to an optimized port platform integrating the behavior and actions of users. According to (Beugin, 2006) a system is said to be complex when the relationships linking the components are multiple, interdependent and looped. In the same aspect, (Guérard., 2014) asserts that the science of complex systems studies systems with many components by nature independent, highly interconnected and interacting. Next, (Bittencourt et al., 2016) presented a complex model as an emergent phenomenon resulting from interactions within a network of determinants; methodological implications of using a complex systemic approach and the application of a complex model. We say that a complex system is "A system that involves many interacting agents whose aggregated behaviors must be understood.

Smart ports have many properties common to complex systems such as the heterogeneity of the elements, the impact of internal and external factors on port management and the need for a measurement and control tool to solve the problem of behavior and dynamics at any scale. In addition, they interact with their environment. The complexity of the port systems remains a vague and subjective notion, it characterizes the systems whose mastery of design, maintenance and evolution pose significant problems, related to their size and the number of technologies used, which makes the whole difficult to apprehend. In this instance, complex port systems are being distinguished from other technically complicated systems.

3.2 Increased competition between port terminals

In a context of increased competition between port terminals, the port reform deployed worldwide since 2008 aims to give major maritime ports the opportunity to

become directly involved in the design of sustainable supply chains.

The emergence of smart ports across Europe requires the integration of innovative technologies from the TIC, transport and energy sectors to become the benchmark for sustainability. The Intelligent Platform for Smart Port consortium (IPaSPort) is initiated by transport and energy to become the benchmark for sustainability.

4 SMART PORT ACTIVITY SYSTEM

4.1 Smart port taxonomy

The port logistics system includes a regional environmental system, an infrastructure system, a logistics information system, a business coordination support system, a well-defined distribution system and a system that is close to the port industry, see Figure.1. They complement each other, are closely related, and form together a port logistics system (Li, 2017).

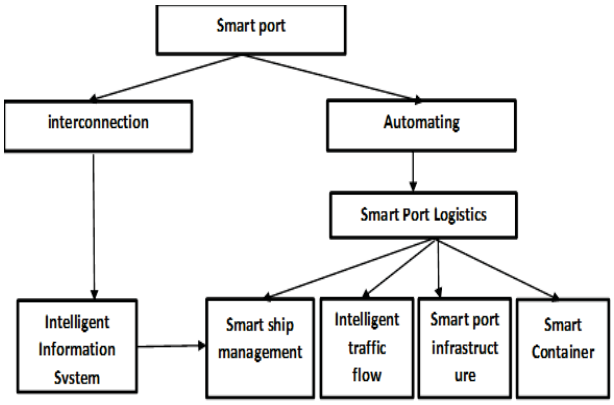


Figure 1: Smart Port Activity System

4.2 Intelligent Information System

Smart ports aim to adopt modern information technologies to enable better planning and management within and between ports. When we talk about a connected port, we are referring to all the technologies that make it possible to lighten administrative procedures and better manage freight traffic. All this requires optimal management of physical flows and information for perfect control of the port chain (Deiss, 2011).

Hence, their role has changed in recent years to fit into an integrated logistics world. An issue that all parties have seized for several years, from port authorities to operational. The management information system would finally become coherent; it would give the decision maker better legibility of activity flows and a much more accurate simulation capability, (Rowe, 2016a).

On the other hand, (Rowe et al., 2018b) introduced the information system that reduces the asymmetry of information between transactional organizations and thereby moderates the effect of the supply environment on supply chain integration (SCI).

Besides, (Rai et al., 2006); (Song and Panayides, 2008) and (Rowe et al., 2018b) defined the Intelligent Information System as "the use of intelligent and seamless communication systems that facilitate the efficient maintenance of supply chain operations between companies".

4.3 Smart ship management

Nowadays, the time of the intelligent ship is at the door. This is the result of the new fourth industrial revolution that is fast approaching. The fourth industrial revolution is the result of a huge increase in the amount of information acquired, stored, processed and transmitted. This has resulted in intelligent home appliances, robots, telephones, production machines and other objects, visible throughout everyday life. It is now debated whether intelligent ships would be fully autonomous, remotely controlled or crewed, who would be responsible for the vessel in question, and how smart ships would affect shipping. The recent trend to design more efficient and versatile vessels allows for a variety of intelligent port architectures. To improve performance with these architectures, intelligent control strategies are needed.

In fact, the smart ship connected with the smart port to collaborate automatically in the planning of docks, in the preparation of cargo handling operations and work and materials handling and in the organization of truckers to the hour. The thing that improves the management of fleets and minimizes the waiting time of vessels at the dock and also the time of inactivity. This collaboration between the ship and the port has a considerable marketing impact for the port to become a smart port (Douaioui et al., 2018).

The ship design typically includes three to four phases: design, fabrication, preliminary design and operation of vessels. These design processes are extremely complex processes and consume large amounts of energy throughout their life cycle, (Ang et al., 2016a), (Ang et al, 2017b). Moreover, Information technology (IT) and sensor technology have made many new steps possible in ship automation. Furthermore, Intelligent ship design is qualified that has interconnected capabilities that can potentially elevate and expand the entire shipbuilding process using computer intelligence techniques. Designing smart ships, i.e. making ships with built-in intelligent capabilities (Ang et al., 2016a).

In the same aspect, (Kobyliński, 2018) has defined the smart ship 'According to the general understanding the smart ship is a ship that is either: remote controlled or fully autonomous. In both cases the ship could be unmanned or manned with a skeleton crew'. This applies to collecting, processing, and transmitting the data from

sensors and appliances on board the ship and transmitting it to the shore station, to a unified bridge for remote-controlled unmanned ships, to effective autonomous collision avoidance systems, and to advanced sensor technology.

4.4 Intelligent traffic flow

The objective of traffic management systems is to make use of this information infrastructure so as to interpret the different states of traffic flow and react accordingly in order to maintain or improve the overall performance of the supervised network. This kind of activity obviously requires an intelligent behavior of the system. An effective way of achieving this kind of intelligent behavior, is to endow the system with knowledge about the structure and the dynamics of controlled network. This knowledge is supplied by the human operators and is used to identify critical traffic situations as well as to decide on the most appropriate control actions to be taken. (Hernández et al., 2002) argues in favor of the concept of intelligent traffic management systems (ITMS) as a means of integrating the increasingly complex and heterogeneous traffic control infrastructure and providing a means of strategic support for traffic management.

In traditional traffic detection, infrared detection systems are most commonly used for their ability to count traffic. However, when vehicles are traveling either too closely to each other or in parallel at high speed, such a traffic detection system can easily make a misjudgment, resulting in the failure of a supposedly intelligent traffic signal system to adjust the timing of traffic signals (Chao and Chen, 2014). However, in (Zhou et al., 2010), the controller incorporates the Traffic System Communication Algorithm (TSCA) and the Traffic Signal Time Algorithm (TSTMA) using the WSN technology proposed. Moreover, in (Ngoduy, 2013), The author aims to derive analytical conditions describing the instability of heterogeneous intelligent traffic flow using an extended (microscopic) multi-class Intelligent Driver Model (IDM) with different time delays

4.5 Smart port infrastructure

Smart ports urgently need to be tightly integrated within IoT to ensure efficient data sharing and stability of port services. In other words, smart ports are a new generation of ports, with new intelligent port infrastructure and integrated, intelligent management and service. So, establishing intelligent infrastructure is imperative to ensure smooth and efficient traffic flows and, ultimately, trade flows in the Port of Hamburg. Intelligent information technology consists of elements such as Bluetooth, hotspots or WLAN, cloud, mobile end devices, Internet of Things and Big Data. Moreover, ports are regional multimodal intersections of global supply chains. They function in the context of complex infrastructure, business transactions, and regulations. With the global economy demanding maritime transportation, ports have faced increasing pressure to optimize their performance in terms of economic, environmental, energy, and functional challenges that impact their sustainability (Molavi et al., 2019).

A smart port has all the information technology‘s infrastructure and information structure, the latest technologies in the fields of telecommunications, electronics and mechanics, all the information technology infrastructure and the information structure and the latest technologies in the fields of telecommunications, electronics and mechanics. Consequently, a stepping-stone is necessary for the software infrastructure to allow us to rapidly prototype intelligent, or context-aware, services within such an environment (Dey et al., 2000). In addition, according to (Skopik et al., 2012), these three pillars, namely i) confidentiality, ii) integrity and iii) availability, constitute the basis of the concept of smart meter infrastructures.
The infrastructure must support interoperability of context widgets and applications of computing and programming languages on heterogeneous platforms environment (Dey et al., 2000).

4.6 Smart container

For many years, one of the major goals for reaching a smart port is container evolution. The concept of the "Smart Container" is to make the container intelligent so that it can communicate useful, targeted and real-time information. It allows all actors (carriers, freight forwarders or end customers) to have value-added information reflecting the actual progress of a transport and the status of the goods. This information is essential for carriers to improve their services, but also for their customers to help them manage their supply chain. Smart Container as a data sharing facilitator. In summary, the smart container is a key element of multimodal coordination and exception process management. It can detect and communicate real-time information for multimodal transport and improved logistics. Several researches work and approaches have been presented to treat the methods that apply the smart container. We will mention some works encountered in the literature; because containers are densely distributed in a port, it is difficult to identify and transmit the data effectively. To protect the cargo from damage, theft and terrorist threats, businesses and governments are turning to wireless sensors and RFID tags. The Tradition container is replaced by a smart container.

(Zhang et al., 2008) used RFID electronic seals that have both commercial and security interests by tracking commercial container shipments from their point of origin, en route to their destination and at the point of clearance. Their main purpose was to protect the cargo from damage, theft and terrorist threats. In 2010, (Brackmann et al., 2010) showed that the intelligent container system includes universal "crates-pallets", audible, sealable, stackable, traceable and can be scanned. Then,

they were applied to electronic locks, sensors and sophisticated alarms powered by battery were provided, as well as an RF communication and GPS location module that transmits to a base station the time, location and status of the inventive Smart Cargo Container, as well as any abnormal events, including unauthorized attempts of opening or penetrating the container, or any potential damage. On the other hand, (Jurenoks, 2015) presented ICON, intelligent container abbreviations, which are self-managed entities providing applications or service infrastructures, they showed the novelty of ICON in the ability of containers to adapt to their environment, to target near-optimal service delivery and to require only high-level advice from application management. They used IT facilities provided by the Independent Edge Providers (IEPs). As for (Jakovlev et al., 2018), they proposed a WSN (wireless sensor networks) technology that can be very useful when it is used to acquire and send data collected over large areas, and they have used ICT to quickly pre-select high risk and to develop secure and "smart" containers, but the results showed that this technology is not able to direct communications between multiple containers.(Ruckebusch et al., 2018) also proposed the WSN technology. They established a wireless link between containers and a cellular network, i.e. an extra-container communication and intra-container communication in order to communicate from the outside to the inside of the container and vice versa. In addition, they created an ad hoc network of communication between stacked containers. The challenge is to find innovative solutions to balance service requirements while integrating automated and non-automated cargo handling equipment into container terminals to ensure sustainability, safety and security.

5 CLASSIFICATION OF ARTICLES

After presenting the different works dealing with port activities in the maritime transport sector since 2003, in this section, we will try to classify these various works according to different criterion such as activities, methods, new technologies and the most representative software commonly used in the academic and industrial world.

Several authors have used different port activity with different methods have proposed the intelligent container as a port activity such as: (Ruckebusch et al., 2018), (Tang and Dai, 2008), (Moccia et al., 2008),(Arango et al., 2011), (Laganá et al., 2006), (Ślączka et al., 2017), and (Anwar, 2019). However each author has used a method or the technology different from the other. For example (Ruckebusch et al., 2018) has proposed the smart container as a port activity and they have used intelligent container overlays technology. In the same aspect (Zhao, 2014) has proposed the smart container as a port activity, but they have used wireless sensor network technology. In (Najib, 2014), (Jakovlev et al., 2018) and (Castilla et al., 2020) authors have treated the container terminal problem. As the problem is NP-Hard, they have presented an innovative mathematical formulation as a Linear Programming (Zavodovski et al., 2018), (Jakovlev et al., 2018), (Khatiashvili et al, 2006),(Najib, 2014). In (Arango et al., 2011), (Wang et al., 2006), and (Cortés et al., 2007), they have tackled the Ship loading and unloading problem. They have solved this problem as Simulation in (Cortés et al., 2007), (Arango et al., 2011), and Metaheuristic in (Wang et al., 2006). In (Zhao, 2014), (Mondragon et al., 2015a), (Mondragon et al, 2012b), (Ślączka et al., 2017),(Tang and Dai, 2008),(McGinley, 2014) ,(Layaa and Dullaert, 2014),(Laganá et al., 2006), (Kim and Moon, 2003) they have introduced the intelligent transportation system problem. To solve the problem, they have proposed two method, the first one is the simulation method and the second one is the linear programming.

5.1 Port activities

According to the research discussed in this paper, the port activities can be treated under different activities which are presented in Figure 2: container terminals, Ship loading and unloading, intelligent transportation system, smart container and customs.

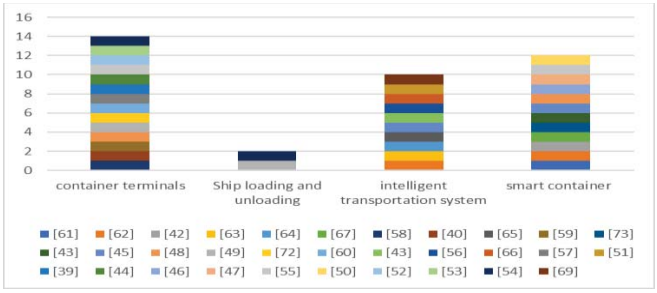


Figure 2: Port activities (see annex for key description)

From of the figure 2 we can note a significant number of container terminals and an almost total lack of work of the Customs.

5.2 The methods

Referring of the Figure 3, we notice that most of the researchers have used the simulation method, while others choose to use different ones noting: the metaheuristic method, the linear programming, etc.

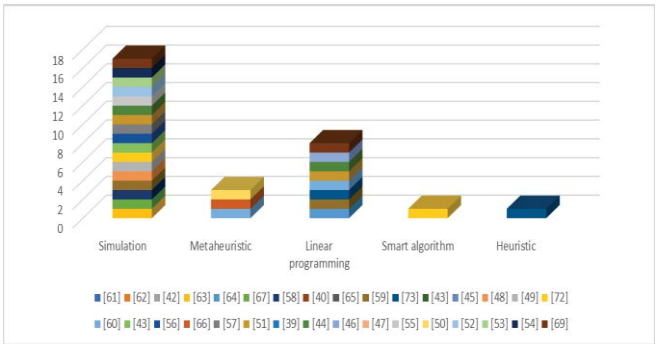


Figure 3: Used methods (see annex for the key description)

5.3 Technologies

According of the Figure 4, we conclude that the WAN (wireless sensor network) is the most recent and used technology, meanwhile, despite being an innovative technology, the vehicular environment is not the most used.

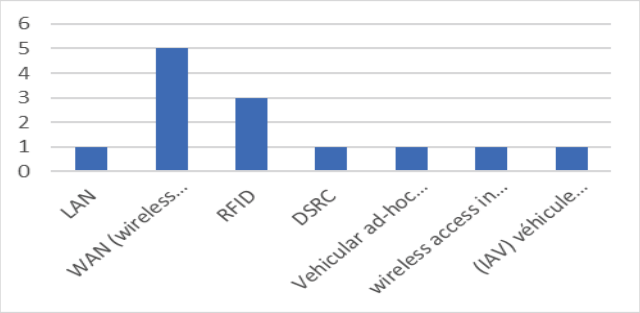


Figure 4: Used technologies

5.4 Softwares

From of the Figure 5, we note that the CPLEX and ARENA Softwares are the most used ones even though they are regarded as old Softwares

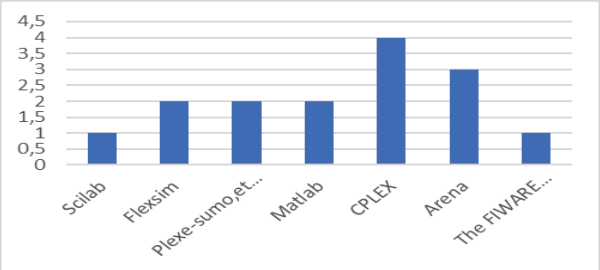


Figure 5: Used Softwares

6 CONCLUSION

In this work, we have presented a reference paper for the recent literature review treating the smart port activities. To further develop Tunisian port research a solid academic field, new conceptualization and modeling are in high demand. Within the methodology followed, an intelligent port relies on the interconnection of port activities actors, the automation of the equipment and the operations of the port terminal to improve the fluidity, the reliability, the security of information exchange and to take real-time decisions. These practices also increase the productivity of the smart port and improve its energetic efficiency. Based on our effort, we point out that: the activities, methods, new technologies and the most representative Software. We have noticed that most of the authors have used the container terminal as a port activity.

For the future, we can envisage two stimulating research directions. The first consists in proposing resolution methods for the problem with instances and parameters of much larger size and in proposing a new concept of smart port with the use of the concept of artificial intelligence, bigdata, Data Mining and Blockchain technology. in a Tunisian container terminal in Radès.

A second avenue of interesting research would be to minimize the planned transfer times between storage locations and container berths by using AGV vehicle with new technology.

REFERENCES

Al-Dhaheri, N., Jebali, A. and Diabat, A., 2016. A simulation-based Genetic Algorithm approach for the quay crane scheduling under uncertainty. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 66, p. 122-138

Almaz, O.A., and Altiok, T., 2012. Simulation modeling of the vessel traffic in Delaware River: Impact of deepening on port performance. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 22, p. 146-165

Alrawi, F., 2017. The importance of intelligent transport systems in the preservation of the environment and reduction of harmful gases. *Transportation research procedia*, 24, p. 197-203

Ang, J. Goh, C. Saldivar, A. and Li, Y., 2017. Energy-efficient through-life smart design, manufacturing and operation of ships in an industry 4.0 environment, *Energies*, 10(5), p. 610

Ang, J.H., Goh, C. and Li, Y., 2016. Smart design for ships in a smart product through-life and industry 4.0 environment. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'2016)*, Vancouver, BC, Canada, p. 5301-5308.

Aramrattana, M., Larsson, T., Jansson, J. and Nåbo A., 2019. A simulation framework for cooperative intelligent transport systems testing and evaluation. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 61, p. 268-280

Arango, C., Cortés, P., Muñuzuri, J. and Onieva, L., 2011. Berth allocation planning in Seville inland port by simulation and optimisation. *Advanced Engineering Informatics*. 25(3), p. 452-461

Arsan, T., 2016. Smart systems: from design to implementation of embedded smart systems, *13th International Symposium on "Smart MicroGrids for Sustainable Energy Sources enabled by Photonics and IoT Sensors" (HONET-ICT'2016)*, 13-14 October, Nicosia, Cyprus, p. 59–64.

Arumugam, S.S., Umashankar, V., Narendra, N.C., Badrinath, R., Mujumdar, A.P., Holler, J., and Hernandez, A., 2018. IOT enabled smart logistics using smart contracts. 8th IEEE International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS'2018), 3-6 August, Toronto, ON, Canada, pp. 1-6.

Barceló, J., Codina, E., Casas, J., Ferrer, J.L. and García, D., 2005. Microscopic traffic simulation: A tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. *Journal of intelligent and robotic systems*, 41(2-3), p. 173–203

Benghalia, A., 2015. *Modélisation et évaluation de la performance des terminaux portuaires*, Doctoral dissertation, Université Du Havre, France

Beugin, J., 2006. *Contribution à l'évaluation de la sécurité des systèmes complexes de transport guidé*. Doctoral dissertation, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, France

Bittencourt, N.F.N. Meeuwisse, W.H. Mendonça, L.D. Nettel-Aguirre, A., Ocarino, J.M., and Fonseca, S.T., 2016. Complex systems approach for sports injuries: moving from risk factor identification to injury pattern recognition-narrative review and new concept. *British journal of sports medicine*, 50(21), p. 1309–1314

Brackmann, R.F., Brackmann, J.R., Kossnar, D.J., Ash, D. and Dulin, J.M. 2010. *Smart pallet-box cargo container*, U.S. Patent No. 7,714,708. Washington, DC: U.SA. Patent and Trademark Office

Chao K.H. and Chen, P.-Y., 2014. An intelligent traffic flow control system based on radio frequency identification and wireless sensor networks. *International journal of distributed sensor networks*, 10(5), p. 694545,

Cortés, P., Muñuzuri, J., Ibáñez, J.N. and Guadix, J. 2007. Simulation of freight traffic in the Seville inland port. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(3), p. 256-271

Deiss H., 2011. La mutualisation portuaire vers la logistique intégrée. *Journal de la Marine Marchande – Logistique portuaire*, 25 mars 2011, p. 16-17, https://issuu.com/wk-transport-logistique.fr/docs/journal-marine-marchande-logistique-portuaire-mars/2 [accessed 12 june 2019].

Dey, A.K. Abowd, G.D. and Salber, D., 2000. A context-based infrastructure for smart environments, In *Managing Interactions in Smart Environments*, p. 114–128, Springer, London

Douaioui, K., Fri, M. and Mabrouki, C., 2018. Smart port: Design and perspectives. *4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL'2018)*, 10-12 April, Le Havre, France, p. 1–6.

Guérard, G., 2014. *Optimisation de la diffusion de l'énergie dans les smarts-grids*, Doctoral dissertation, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, France

Gungor, V.C., Sahin, D., Kokac T. et al., 2011. Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(4), p. 529-539

Hall, R.E., Bowerman, B., Braverman, J., Taylor, J., Todosow, H. and Von Wimmersperg, U., 2000. The vision of a smart city, *2nd International Life Extension Technology Workshop*, September 28, Paris, France, BNL-67902

Hernández, J.Z. Ossowski, S. and Garcıa-Serrano, A., 2002. Multiagent architectures for intelligent traffic management systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(5-6), p. 473–506

Jakovlev, S., Senulis, A., Kurmis, M., Drungilas D. and Lukosius Z., 2018. Intelligent Containers Network Concept. *In Proceedings of the 4th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS'2018)*, March 16-18, Funchal, Madeira, Portugal.Vol. 1, p. 568-574.

Jurenoks, A., 2015. Method for node lifetime assessment in wireless sensor network with dynamic coordinator. *In 3rd IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*. 13 – 14 November 2015, Riga, Latvia, pp. 1-5

Khatiashvili, S., Bakeev, C. and Fidler, M., 2006. Application of simulation modelling to harbour operations. *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, September 2006, 159(3), p. 121-128, Thomas Telford Ltd.

Kobyliński, L., 2018. Smart ships–autonomous or remote controlled? *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 53(125), p. 28-34

Kofjac, D., Skuric, M., Dragovic, B., and A. Skraba, 2013. Traffic modelling and performance evaluation in the kotor cruise port. *Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 59(9), p. 526-537

Laganá, D., Legato, P., Pisacane, O. and Vocaturo, F., 2006. Résoudre des problèmes d'optimisation de la simulation sur des systèmes informatiques en grille. *Parallel Computing*, 32(9), p. 688-700

Layaa, J. and Dullaert, W., 2014. Measuring and analysing terminal capacity in East Africa: The case of the seaport of Dar es Salaam. *Maritime Economics & Logistics*, 16(2), p. 141–164

Li, H., 2017. Empirical Research and Evaluation on Capability of Port Logistics Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 32(14), p. 426-434

Lund, H. Østergaard, P.A. Connolly, D. and Mathiesen, B.V., 2017. Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, p. 556-565

McGinley, K., 2014. Preparing port container terminals for the future: making the most of intelligent transport systems (ITS). *Urban Transp XX*, 138, p. 419-427

Moccia, L., Cordeau, J.F., Gaudioso, M. and Laporte, G., 2006. A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal. *Naval Research Logistics*, 53(1), p. 45-59

Molavi, A., Lim, G.J. and Race, B., 2019. A framework for building a smart port and smart port index. *International Journal of Sustainable Transportation*, pp. 1-13, https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1610919

Mondragon, A.E.C., Coronado, E.S. and Mondragon, C.E.C., 2015. Defining a convergence network platform framework for smart grid and intelligent transport systems. *Energy*, 89, p. 402-409

Mondragon, A.E.C., Mondragon, E.S.C., Mondragon, C.E.C. and Mung'au, F., 2012. Estimating the performance of intelligent transport systems wireless services for multimodal logistics applications. *Expert Systems with Applications*, 39(4), p. 3939-3949

Najib, M., 2014. *Gestion des risques liés au transport des matières dangereuses*, Doctoral dissertation, Université Du Havre, France

Nam T. and Pardo, T.A., 2011. Smart City As Urban Innovation: Focusing on Management, Policy, and Context. *In Proceedings of the 5th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance (ICEGOV2011)*, 26-28 October, Tallinn, Estonia, p. 185–194.

Ngoduy, D., 2013. Analytical studies on the instabilities of heterogeneous intelligent traffic flow. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18(10), p. 2699–2706

Oonk, M., 2016. Smart Logistics Corridors and the Benefits of Intelligent Transport Systems. *In Towards Innovative Freight and Logistics*.Blanquart, C., Clausen, U. and Jacob, B., Éds. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., p. 1-14.

Panayides, P.M., and Song, D.W., 2008. Evaluating the integration of seaport container terminals in supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(7), p. 562-584.

Petrlic, R., 2010. A privacy-preserving Concept for Smart Grids, *Sicherheit in vernetzten Systemen*, 18, p. B1-B14

Postránecký M. and Svítek, M., 2017.Smart city near to 4.0—an adoption of industry 4.0 conceptual model. *Smart City Symposium (SCSP'2017)*. 25-26 May, Prague, Czech Republic, p. 1–5.

Qin, H. Li, H. and Zhao, X., 2010. Development status of domestic and foreign smart city. *Global Presence*, 9, p. 50–52

Rai, A. Patnayakuni, R. and Seth, N., 2006. Firm performance impacts of digitally enabled supply chain integration capabilities, *MIS quarterly*, 30(2), p. 225-246.

Rowe, C.M., Wong, W.P. and Soh, K.L., 2018. Dynamics of supply environment and information system: Integration, green economy and performance. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, p. 536–550

Rowe, F., 2016. Cohérence, intégration informationnelle et changement : esquisse d'un programme de recherche à partir des Progiciels Intégrés de Gestion, Systemes d'information management, 21(2), p. 49-66

Ruckebusch, P., Hoebeke, J., De Poorter, E. and Moerman, I., 2018. Smart container monitoring using custom-made WSN technology: from business case to prototype. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018(1), p. 16

Skopik, F. Ma, Z. Bleier, T. and Grüneis, H., 2012. A survey on threats and vulnerabilities in smart metering infrastructures, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 1(1), p. 22–28

Stampfli C. and Collaros, A., 2010. *L'intégration sociale et scolaire de l'enfant à haut potentiel en classe régulière*. Master Thesis, Haute école pédagogique du canton de Vaud, Lusanne, Switzerland

Su, K., Li, J. and Fu, H., 2011. Smart city and the applications. *International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC'2011)*, 9-11 September, Ningbo, China, p. 1028-1031.

Tang, L. and Dai, L., 2008. Berth allocation with service priority for container terminal of hub port. *4th IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM'2008)*, 19-21September, Dalian, China, p. 1-4

Tian, Y., He, S. and Huang, G., 2009. Market Entry of Duopoly Wharf Enterprises at Container Port with Network Externality. *In IEEE International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA'2009)*, 23-24 May, Wuhan, China, p. 1-4

Trappey, A.J.C. Trappey, C.V. Fan, C.Y. Hsu, A.P.T. Li, X.K. and Lee, I.J.Y., 2017. IoT patent roadmap for smart logistic service provision in the context of Industry 4.0, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 40(7), p. 593-602

Uckelmann, D., 2008. *A Definition Approach to Smart Logistics*, in Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking, S. Balandin, D. Moltchanov, et Y. Koucheryavy, Éd. Springer Berlin, Heidelberg, p. 273-284

Wang, Y., Lee, S. and Xue, P., 2006. An ITS Dynamics Model Simulator Based on SCILAB. *In proceeding of International Workshop on Open Source Software Scilab and its Engineering Application*. August 29, Hangzhou, China, p. 97-105

Xisong, D., Gang, X. Yuantao, L. Xiujiang, G. and Yisheng, L., 2013. Intelligent ports based on Internet of Things. *In Proceedings of IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI'2013)*, 28-30 July 2013, Dongguan, China, p. 292–296.

Zavodovski, A., Mohan, N., Bayhan, S., Wong, W. and Kangasharju, J., 2018. ICON: Intelligent Container Overlays. *In Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, November 15–16, 2018, Redmond, WA, USA, p. 15-21

Zehendner, E., Rodriguez-Verjan, G., Absi, N., Dauzère-Pérès, S. and Feillet, D., 2015. Optimized allocation of straddle carriers to reduce overall delays at multimodal container terminals. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2-3), p. 300-330

Zeinebou, Z. and Benabdelhafid, A., 2013. Development of a model of decision support for optimization of physical flows in a container terminal. *In IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT'2013)*, 29-31 May, Sousse, Tunisia, pp. 421-426

Zhang, J. Liu, Y.Q., Yu C.Y. and Zhang, C.F., 2008. Smart Container Security the E-seal with RFID Technology. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety od Sea Transportation*, 2(1), p. 99-101

Zhang, T., Zhao, Q. and Wu, W., 2009. Bi-level programming model of container port game in the container transport supernetwork. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 31(1-2), p.13-32

Zhao, R., 2014. The Analysis of Dalian Port Container Transportation Competitiveness. *International Conference on Mechatronics, Control and Electronic*

Engineering (MCE'2014). August 29-31, Shenyang, China, Atlantis Press

Zhou, B. Cao, J. Zeng, X. and Wu, H., 2010. Adaptive traffic light control in wireless sensor network-based intelligent transportation system. *72nd IEEE Vehicular Technology Conference-Fall (VTC'2010)*, September 6-9 2010, Ottawa, Canada, p. 1–5.

ANNEX

Key description for **Figure 2 and Figure 3:**

[39] (Jakovlev et al, 2018), [41] (Zhao, 2014), [42] (Zhang et al, 2009), [43] (McGinley, 2014), [44] (Tian et al, 2009), [45] (Tan and Dai, 2008), [46] (Najib, 2014), [47] (Benghalia, 2015), [48] (Moccia et al, 2006), [49] (Arango et al, 2011), [50] (Wang et al, 2006), [51] (Khatiashvili et al, 2006), [52] (Laganá et al, 2006), [53] (Cortés et al, 2007), [54] (Kofjac et al, 2013), [55] (Almaz et Altiok, 2012), [56] (Al-Dhaheri et al, 2016), [57] (Zehendner et al, 2015), [58] (Zeinebou and Benabdelhafid, 2013), [59] (Zavodovski et al, 2018), [60] (Jakovlev et al, 2018), [61] (Aramrattana et al, 2019), [62] (Alrawi, 2017), [63] (Mondragon et al, 2015a), [64] (Mondragon et al, 2012b), [65] (Ślączka et al, 2017), [66] (Layaa and Dullaert, 2014), [67] (Barceló et al, 2005), [69] (Neal et al, 2019), [72] (Anwar, 2019).

CO_2 EMISSION'S STUDY OF THE HYDROCARBON SUPPLY CHAIN AIMING FOR RESOURCES POOLING STRATEGY

Y. EL BOUAZZAOUI, M. ABOUELALA
Procédés et Contrôles Mécaniques et Thermiques (PCMT)
ENSET
Mohammed v University
Rabat, Morocco
elbouazaoui.youness@gmail.com,
mourad.abou-el-ala@um5.ac.ma

S. A. KEBE, F. MIMOUNI
SMARTiLAB
Ecole Marocaine des Sciences de l'Ingénieur (EMSI)
Rabat, Morocco
ksekab@gmail.com, mimounifaycal@gmail.com

ABSTRACT: *Transport is an activity at the heart of logistics, it plays an essential role in economic and social development. Its contribution to the gross domestic product, to the employment and its share in energy consumption. However, the road transport, especially for petroleum industry sector is not without consequences on social welfare, the depletion of resources, pollution to the eco-system, etc.*

In this paper, We present the current supply chain petroleum products model in Morocco (diesel gasoil and gasoline products as a case study), and we propose the "transport means pooling" as a new organization strategies for sustainable logistics using a simulation approach (ARENA software) based on a real data during 78 months to estimate the parameters variation needed to calculate the CO_2 emissions *in order to improve logistics chains performance in sustainable development context.*
KEYWORDS: *Logistics chain, simulation, resources pooling, sustainable development, environment, CO_2 emissions.*

1 INTRODUCTION

Transport has become a key of success for most companies facing structural changes in the supply chain, its importance is assessed by a consumer market characterized by a strong demand for raw, semi-finished and finished products; a very high level of customer requirements and strong competition between all the players along the logistics chain.

A situation forces the different players in the supply chain to respond to different market demands and to develop their activities in the face of many constraints: social, economic, environmental, etc.

In terms of sustainable development (SD), transport plays an important economic and social role. However, its negative impact on the environment and the degree of safety make it necessary to reconfigure the system.

The laws and regulations currently in force in Morocco remain insufficient to reduce the transport impact, particularly in terms of regulating the flow of goods.

Therefore, transport efficiency becomes an important indicator for improving logistics, and a new organization of the transport sector will be a necessity to be provided by companies in the current limited situation, in order to ensure a more efficient transport system and to reduce the greenhouse gas emissions (GHG) for a sustainable development. In this context our paper focuses on Moroccans hydrocarbon supply chains and propose the pooling of transport resources as a possible solution between the two largest Moroccan petroleum importers, through a simulation approach, an analysis of the current supply chain and an improvement of performance indicators such as loading rate, resource availability, average stock and the rate of greenhouse gas emissions, especially CO_2 emission.

2 STUDY CONTEXT

After the shutdown of the only Moroccan refinery in August 2015, the Moroccan energy security is absolutely depended on imports for all fossil fuels, which account for almost 90% of total primary energy supply (TPES) and Oil constituted 62% of TPES in 2017, followed by coal (22%) and natural gas (5%). The country's energy import bill rose to MAD 69.5 billion in 2017 (USD 7.3 billion, EUR 6.3 billion). (International Energy Agengy IEA report, Morocco 2019)

In 2016, the total Moroccan's storage capacity was around 1.8 million m^3, which its concentrated about 65% in northern Morocco between Mohammedia and Mohammedia (excluding the storage capacity of SAMIR). (Moroccan Agency for Development of Logistics AMDL, 2016).

Furthermore, in the same year, the consumption of the petroleum products achieved 13 million tons, with 3% annual increase rate from 2010 to 2016 and it continued to grow, as shown Figure 1.

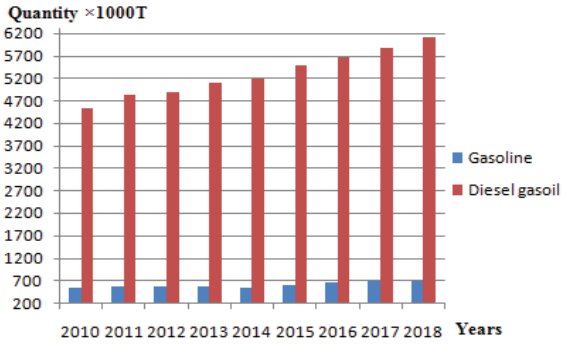
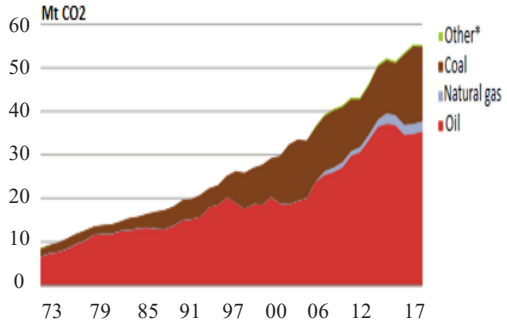


Figure 1: Consumption evolution of petroleum products (Report of the Moroccan parliamentary committee on the hydrocarbons sector, 2018)

Moreover, Morocco's energy security related concerning the global supply chain risks is increasing, and its strategic stock is less than the legal requirements for all products.

In addition, the importation and distribution process of petroleum products (gasoline, diesel gasoil, fuel,...) are dominated by road transport for almost all the flows between the storage facilities and the 2477 petrol stations in the country. (Business Economics, 2018)
This flows tension state generates infrastructures saturation, road networks congestion, transport variation cost according to the barrel price in world market also it creates significant CO_2 emissions.

In 2017, oil was responsible for 64% of total CO_2 emissions and the transport sector created 30% of the global emissions from 2006 to 2017 with an increasing about 63% which runs counter the country's overall strategy for reducing the Greenhouse Gas emissions (GHG). Figure 2 & 3



* Other includes biomass and waste.

Figure 2: Moroccan emissions by fuel, 1973-2017 (International Energy Agency IEA report, CO_2 Emission from Fuel Combustion, Morocco 2018)

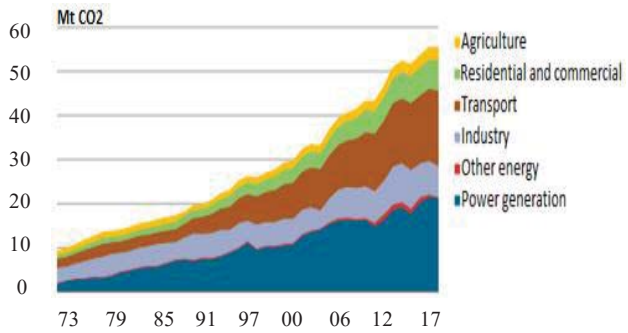


Figure 3: Moroccan emissions by sector, 1973-2017 (International Energy Agency IEA report, CO_2 Emissions from Fuel Combustion, Morocco 2018)

Indeed, the government is worked to increase oil products storage capacities also for its efficient monitoring mechanism of all oil products supplies and it has defined an integrated national development strategy of logistics sector in the horizon 2030. One of the strategy objectives is to reduce of CO_2 emissions by 35% of the road goods transport. (Moroccan Agency for Development of Logistics AMDL, 2016)

The transport resources pooling is therefore an interesting way to explore, particularly in the case of transporting petroleum products. Before proceeding to the complete Moroccan hydrocarbons logistics chain diagnosis, we will present a summary of main works dealing with the transport pooling.

3 LITERATURE REVIEW

According to authors (Pan et al., 2013), Logistic pooling corresponds to partners logistics network co-design (suppliers, customers, carriers, etc.) with a common objective, to share logistic networks (warehouses, platforms, means of transport, etc.) and to provide management needed data. In seeking common goal and close to facilities, pooling is appropriate for logistic chains operating in the same sectors.

Pooling implies a flows massification; that consists in concentrating certain flows on the same site in order to optimize the supply and distribution circuits. (OITC, 2005)

Logistics chain pooling resources issue has been treated in several studies. The majority of works suggest that pooling resources is a solution of various logistics problems in order to improve logistics chain performance.

The next table provides a work summary according to the sector activity and the pooling purpose, the authors highlight in their work the benefits expected from resources pooling in terms of economic, environmental and political performance.

Works	Sectors	Objectives	Results
How fairness perceptions, embeddedness, and knowledge sharing drive green innovation in sustainable supply chains: an equity theory and network perspective to achieve sustainable development goals (Zhou et al., 2020)	Green innovation	Examination of embeddedness, knowledge sharing, and green innovation in the sustainable supply chain.	-Embeddedness and knowledge sharing have a partial impact on green innovation in the sustainable supply chain; -Company size as a control variable is a positive effect on green innovation.
Throughput optimization in a coal export system with multiple terminals and shared resources (Rocha et al., 2019)	Exportation	-Optimization of the Hunter Valley coal export system in Newcastle, Australia with sharing a rail network on their inbound/outbound operations; -Maximizing of flow at a single coal terminal with sharing resources simultaneously.	The solutions are on average 17% better than those obtained with the current method.
Information Sharing in Logistics Firms: An Exploratory Study of the Vietnamese Logistics Sector (Pham et al., 2019)	Logistics firm	-Examination the role of information logistics and methods shared with the firms and their partners; -Influencing factors of the sharing practice on supply chain logistics.	Influencing factors practices are: • Technical capability; • Security risks; • Organization rules and policies; • Mutual trust.
Benefit analysis of shared depot resources for multi-depot vehicle routing problem with fuel consumption (Li et al., 2018)	Transport/ Storage	Quantifying the benefit of shared depot resources.	The benefit of shared depot resources depends on instance characteristics (depot–customer geographic distribution, maximum route distance, and number of depots).
A multi-agent system for sharing distributed manufacturing resources (Li et al., 2018)	Distribution	Proposition a multi-agent system based approach to promote competition and cooperation among multi-agents and to achieve global optimal scheduling.	Enterprise alliance multi-agent system (EA-MAS) which integrates a sharing resource information, provides shared scheduling scheme for distributed manufacturing with a good performance.
Green supply chain game model and analysis under revenue-sharing contract (Song et al., 2017)	Green supply chain	Quantitative analysis of contact impact on decision variables and supply chain performance.	Manufacturer and retailer get an important profit by using a sharing contract.
Allocation of Transportation Cost & CO_2 Emission in Pooled Supply Chains Using Cooperative Game Theory (Xu et al., 2012)	Transport	Implementation of the horizontal supply chain pooling for reducing transportation cost and CO_2 emission.	Pooling scheme reduced the transportation cost and the carbon tax (cost-reduction rate of 25.98%).

Table 1: Published works on the pooling of resources in different sectors

In general, the hydrocarbon's transport in Morocco under land and sea routes constitutes nearly 14% of the global costs of the logistics chain, with a fleet of more than 1200 tanker trucks rolling over the national territory. In 2014, the distance traveled by all the tankers of the same company from Mohammedia to all the warehouses (Casablanca, El Jadida, Jorf lasfar, Larache, Mdiq, Tangier, Marrakech, Nador and Meknes) was estimated at 3 813 000 km, with an empty transport estimated at 50% over the whole of this distance, and a total quantity of diesel and unleaded lead transported on the order of 352 000 tons. (SAMIR, 2019)

In view of these distances traveled, and these empty tours, naturally raises the question of the transport resources' pooling for these main importers. To what extent would the pooling of distribution means (trucks), allow a reduction of CO_2 emissions? Before answering this question in the simulation part, we present below the methodologies for calculating CO_2 emissions.

4 METHODOLOGY FOR CALCULATING CO_2 EMISSIONS

The quantity of CO_2 emitted by trucks comes from the combustion of fuels producing the energy needed to transport goods. These emissions have a direct relationship with the quantities transported and the distances traveled.

Several references are available in the literature, using different methodologies and units for the calculation of gas emissions, making comparisons difficult of all the results produced. For this purpose, three units are widely used for the measurement of Greenhouse Gases (GHG) or CO_2 alone: (Pan, S., 2010)

- Carbon equivalent (kg eq C)
- CO_2 equivalent (kg CO_2 eq)
- Emission of CO_2 alone (kg CO_2).

In this article, we will present all results only in CO_2 emission; it is the amount of CO_2 emitted directly.

The global fleet studied in this paper composed of a Heavy Duty Vehicle HDV tanker truck for transporting petroleum products, which its capacity limited on 32-40 tons.

The project report of Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport (MEET) defines the global pollutant emissions emitted of a vehicle in circulation as the sum of emissions when the vehicle is warm after the start (E_{hot}); emissions when starting the vehicle ($E_{start\text{-}up}$) and emissions due to fuel evaporation ($E_{evaporation}$). The function is of the form: (Hickman et al., 1999)

$$E_{total} = E_{hot} + E_{start\text{-}up} + E_{evaporation} \quad (1)$$

According to The deliverable report of MEET (Hickman et al., 1999), CO_2 emission is not concerned by this emission type $E_{evaporation}$. In our study, transport is always over a long distance (365km), which allows us to neglect the vehicle's starting emissions that only exist when the engine is cold.

$$E_{total} = E_{hot} \quad (2)$$

Therefore, we can calculate the rate of emission for an unloaded vehicle, on a road with a 0% gradient by the following function in form: (Hickman et al., 1999)

$$E_{hot} = K + av + bv^2 + cv^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \quad (3)$$

Where: ε is the rate of emission (g/km) for an unloaded vehicle on a road with a 0% gradient; K is a constant; a-f are coefficients; v is the mean velocity of the vehicle (km/h).

According to the same report, vehicle load and road gradient both are two correction factors the most important proposed to calculate the total emissions emitted by a vehicle.

4.1 Gradient correction factor :

The gradient factor can be calculated as a polynomial function in the following: (Hickman et al., 1999)

$$as = A6.v^6 + A5.v^5 + A4.v^4 + A3.v^3 + A2.v^2 + A1.v^1 + A0 \quad (4)$$

Where: as is the correction factor ; v is the mean speed in km/h; A0-A6 are constants for each pollutant, vehicle and gradient class.

Furthermore, we can calculate the emission factor due to gradient road factor as the following:(Hickman et al., 1999)

$$E\,c_{hot} = as \times E_{hot} \quad (5)$$

where: $E\,c_{hot}$ is the corrected emission by the gradient factor of the CO_2 pollutant (g/km); E_{hot} is the emission factor (g/km) with 0% gradient.

4.2 Vehicle loading factor:

Scientifically, a big mass requires a great energy during a trip to move it, in the next function we calculate the emission factor for a vehicle in loading state: (Hickman et al., 1999)

$$\varepsilon = E_{hot} \times \Phi(\gamma, v) \quad (6)$$

Where: ε is the emission factor when loaded in g/km; E_{hot} is the emission factor when unloaded (g/km); $\Phi(\gamma,v)$ is the load correction factor function; γ is the gradient (%); v is the mean velocity of the vehicle (km/h).

Load correction factor functions $\Phi(\gamma,v)$ are of the form: (Hickman et al., 1999)

$$\Phi(\gamma,v) = k + n\gamma + p\gamma^2 + q\gamma^3 + rv + sv^2 + tv^3 + u/v \quad (7)$$

Where: k is a constant; n-u are coefficients.

According to the above factors, which are the vehicle load and road gradient, the total emission can be presented in following function form: $E_{g/km} = E_{hot} \times as \times \Phi(\gamma,v)$ (8)

Moreover, we calculate the CO_2 emission in two levels: Firstly, we consider the quantity emitted is totally dependent on the vehicle loading rate, the distance traveled and the truck average speed. The following simplified formula allows us to calculate the CO_2 emission in function only to the loading rate by ignoring the gradient factor, so the formula (8) will be by integrating the equations (4) and (7) as following: (Pan, S., 2010)

$$\varepsilon = E_{hot} \times \Phi(\gamma,v) \quad (9)$$

$$\varepsilon = (1576 - 17{,}6v + 0{,}00117v^3 + 36067/v^2) \times [1 + \alpha(0{,}43 - 0{,}916/v)] \quad (10)$$

$$\varepsilon = 0{,}417\alpha + 0{,}753 \quad (11)$$

Where: α is the rate loading of truck; v is the mean velocity of the vehicle in km/h. With: α=1 for a full load regime and α=0 for an empty load regime. All coefficients and constants for the calculation of the gradient correction factor and

loading vehicle factor are presented in tables A27, A40 and A46 on the project report MEET. (Hickman et al., 1999)

Secondly, we calculate the CO_2 emission by adding the road gradient as a parameter for analyzing the influence of this last on the total quantity emitted by the fleet used in our study. (Equation 8)

5 SIMULATION

We build a simulation model using the software Arena simulation to assess gas emissions emitted by a fleet of tanker trucks during transportation of petroleum products.
We start our simulation model by creating an entity for company A, for a regular period of a demand, then we assign the declared entity with its mathematical function presented the company needs.

The simulation is done on two possible cases:

Case 1: The loading carries out with the regional stock using the bloc "Decide", if the demand validates the following condition:

Tank capacity(Tangier)-Demand > 0.5×Tank capacity(Tangier)

So the loading will do successfully and the process will be finished by the "Dispose" block.

Case 2: The demand is treated by a national storage (Mohammedia) by creating a "process" block. After the trucks are loading, and they returned to Tangier city, we create a "Record" block to calculate the number of trucks used in this operation, also the quantity of CO_2 emitted during the transportation process.

The objective of our simulation will be to obtain the distance traveled by the carriers and their load factors in order to measure the CO_2 emission for different fuel distribution companies. In this part, we propose studying the hydrocarbon transport's ecological impact. For this reason, we will extract from the simulation the total distance traveled by all the means of transport in order to measure the CO_2 emission. To measure this distance, we will have as input data for our model:

- The demand of different stations;
- The capacity of each carrier;
- The distance to be traveled between the different places of interest and The means of transport used.

5.1 Modeling the hydrocarbon transport process

The hydrocarbons' import is mainly from the various ports of the country and the supply is based on need. The provisioning model is represented in the following diagram:



Figure 4: Supply model

The condition on order initiation will be dependent on the stock level of the company's tanks.

5.2 Modeling the distribution process

From the demand forecast, we can generate the different CO_2 emission from the different distances that will be traveled to satisfy the needs of the company's customers. The hydrocarbon distribution model is as follows:

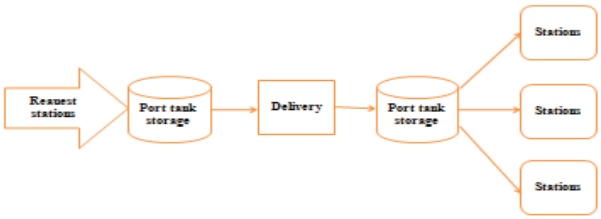


Figure 5: Fuel distribution models

The generated demand will be based on previous requests for different regions of the country for each company.

6 RESULTS AND DISCUSSIONS

The results presented on the following table showed a filling rate α varying around the 0,5 which is consistent with empty trucks returns. However, the two transporters' total emission factor E_{hot} with zero road gradient exceeded 49 million kg and there filling rates approaching 50%.
Consequently, an increase of the filling rate would reduce the total distance traveled, so reducing the CO_2 emissions.
Furthermore, if the road gradient factor is taken into account, the simulation results show that the total corrected emission $E\ c_{hot}$ is higher about 41% than the total emission E_{hot} with 0% road gradient.

Input parameters	Importer A	Importer T
Tank capacity (ton×10^3)	71	34
Fleet	200	67
Distance (km)	365	
Average velocity (km/h)	70	
Slope (%)	0,52	
Emission rate ε (kg/km) (Unloaded vehicle,0% gradient)	0,7527	
Gradient correction factor as	2,1980	
Load correction factor Φ	1,4193	
Emission factor E_{hot} (kg/km) (0% road gradient)	0,9613	0,9610
Corrected emission $E\ c_{hot}$ (kg/km) (gradient factor)	1,3556	1,3556
Emission factor ε_l (kg/km) (Loaded vehicle)	1,0683	

Table 2: Simulation inputs (from Junary 2013 to May 2019)

Output parameters	Importer A	Importer T
Average stock (ton)	448	212
Filling rate α	0,4995	0,4989
Total E_{hot} (kg/km)	33 062 202	16 020 139
Total $E\ c_{hot}$ (kg/km)	46 623 449	22 598 231
Total ε_l (kg/km)	36 742 277	17 808 860

Table 3: Simulation outputs

7 CONCLUSION

The modeling approach discussed in the paper for hydrocarbons logistics chain in Morocco to allow doing simulations regarding to the means of transport's organization.

The simulation allowed us to estimate the parameters variation needed to calculate the CO_2 emissions, which are the total distance traveled, the filling rate α and the road gradient. Moreover, the road gradient factor represents the one of the main parameters to calculate the CO_2 emissions. Moreover, the simulation results show that the total corrected emission $E\ c_{hot}$ is higher about 41% than the total emission E_{hot} with zero road gradient.

In perspective, pooling transport resources between two or more operators could be considered as an approach to increase filling rates, so reducing the environmental impact. Therefore, the next work will propose a mathematical model of petroleum supply chain to minimize the CO_2 emission generated by the global fleet.

REFERENCES

Business Economics, November 2018, p: 59.

Hickman, Hassel, Joumard, Samaras and Sorenson, 1999. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. *Report for the Projet MEET. Transport Research Laboratory. Edinburgh*, p. 70,72,75,80,82,83.

International Energy Agengy IEA report, Morocco 2019

International Energy Agengy IEA report, CO2 Emissions from Fuel Combustion, Morocco 2018, www.iea.org/statistics/.

Li, J., R. Wang, T. Li, Z. Lua, and P. M. Pardalos, 2018. Benefit analysis of shared depot resources for multi-depot vehicle routing problem with fuel consumption. *Transportation Research Part D* 59, 417-432.

Li, K., T. Zhou, , B-H. Liu, and H. Li, 2018. A multi-agent system for sharing distributed manufacturing resources. *Expert Systems With Applications* 99, 32-43.

Moroccan Agency for Development of Logistics AMDL, Moroccan Green Logistics: Sustainable Development at the heart of the logistics dynamics of Morocco, Marrakech COP22-2016, p. 3, 18, 24, 25.

Moroccan Company of Refining Industry "SAMIR", Logistics Department, Transport Department, 2019.

Pan, S., E. Ballot, and F. Fontane, 2013. The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. *International Journal of Production Economics, Elsevier, vol.* 143(1), p. 86-94.

Pham, H. C., H. H. Nguyen, S. Mcdonald, and N. Q. Tran-Kieu, 2019. Information Sharing in Logistics Firms: An Exploratory Study of the Vietnamese Logistics Sector. *The Asian Journal and Logistics*,35(2), P. 87-95.

Report of the Moroccan parliamentary committee on the hydrocarbons sector 2018 (Arabic version), p. 24, 28, 29, 30, 35, 37, 38, 40, 51, 52, 53.

Rocha de Paula, M., N. Boland, A. T. Ernst, A. Mendes, and M. Savelsbergh, 2019. Throughput optimization in a coal export system with multiple terminals and shared resources. *Computers & Industrial Engineering,* 134, P. 37-51.

Pan, S., 2010. Contribution to the definition and evaluation of the pooling of supply chains to reduce CO_2 emissions from transport: application to the case of supermarkets. Management. Doctoral thesis, National School of Mines of Paris.

Song, H., and X. Gao, 2017. Green supply chain game model and analysis under revenue sharing contract. *Journal of Cleaner Production.* https://doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.138

South-East Interconship Office for Transport and Communications (OITC), 2005. A transport policy to support growth, p. 120.

Xu, X., S. Pan, and E. Ballot, 2012. Allocation of Transportation Cost & CO_2 Emission in Pooled Supply Chains Using Cooperative Game Theory. *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Bucharest, Romania, May 23-25.

Zhou, M., K. Govindan, and X. Xie, 2020. How fairness perceptions, embeddedness and knowledge sharing drive green innovation in sustainable supply chains: an equity theory and network perspective to achieve sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120950.

A FRAMEWORK FOR DEVELOPING A PERFORMANCE MEASUREMENT SYSTEM IN HEALTHCARE: A CASE STUDY IN MONTREAL

A. BEN FRADJ[1,2], T. BOUKHERROUB[1,2], C. OLIVIER[1]
1. Department of Systems Engineering & Numerix Laboratory, École de technologie supérieure, 1100, Notre-Dame West, Montréal, Canada H3C 1K3
2. Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT)
anes.ben-fradj.1@etsmtl.net, tasseda.boukherroub@etsmtl.ca, claude.olivier@etsmtl.ca

ABSTRACT: *To meet healthcare organisations' goals such as satisfying their customers in terms of service quality, they need an efficient performance management system. This paper provides an approach to implement a new performance measurement system (PMS) for a large healthcare network in the region of Montreal, Canada (CIUSSS Centre-Sud-de-l'île de Montréal – CCSMTL). At the beginning, we present the data collection method in an attempt to understand the current situation, the data is then analysed using SWOT method. Second, we present our approach consisting of five steps to set up a performance measurement system, for this purpose, we used Analytic Hierarchy Process (AHP) and other mathematical tools. Third, we explain an application of our approach by using a real case study. Finally, we discuss how this approach lead to solve organisational issues, meet the CCSMTL needs and promotes cultural change in the strategic, tactic and operational levels. We also discuss the study limits and the future work.*

KEYWORDS: *Performance measurement, indicators, AHP, Healthcare.*

1 INTRODUCTION

Managers in healthcare and social services sector need engineering tools to contribute to provide high-performance services and achieve customers' satisfaction while implementing innovation and efficiency organisational culture. In the province of Quebec, Canada, the health and social services system is structured into networks called CI(U)SSSs. CI(U)SSSs refer to integrated (University) health and social services centres. They are public bodies under the responsibility of Ministry of Health and Social Services (MSSS). Their mission is to provide general and specialised healthcare and social services to the entire population throughout the province of Quebec while ensuring that these services are accessible, effective, efficient, and of high quality. In Montreal region, where this project is conducted, there are five CI(U)SSSs, which offer services in the West, West-Centre, South-Centre, North and East. Our project is carried out in collaboration with the South-Centre CIUSSS (CIUSSS Centre-Sud-de-l'île de Montréal - CCSMTL). 52 institutions including four hospitals and clinics, 10 community service centres, 14 social rehabilitation centres, 17 residential centres for the elderly, five physical disability assistance centres and two administrative offices have been grouped and merged to create the CCSMTL in April 2015. In its effort to improve the performance of its network and satisfy MSSS's requirements regarding healthcare system performance assessment (MSSS Strategic plan 2019-2023) (MSSS, 2019), the CCSMTL initiated the implementation of its performance model called "integrated Quality-Performance Model" (QPM). The QPM encompasses four performance dimensions: customer, quality-accessibility, mobilization, and optimization (Figure 1).

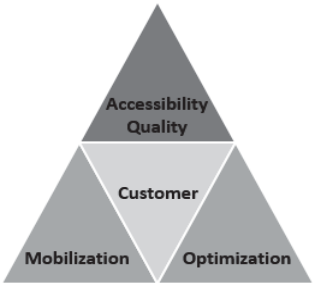


Figure 1: Quality Performance Model of CCSMTL (CCSMTL, 2017)

Each dimension addresses an aspect of CCSMTL performance. For instance, Customer dimension reflects the CCSMTL performance regarding the satisfaction of its customers (people receiving the service or care, his/her relatives, the community and the population) in regards to services and care provided by the CCSMTL. Within each dimension, the CCSMTL identifies different sub-dimensions, which are measured by using a set of performance indicators. The QPM model is based on the two main dimensions: accessibility-quality and customer, which are called in the CCSMTL the "True North" (it is a symbolic name, because these two dimensions take the shape of a compass needle and indicate the right direction to a better performance). The other two dimensions (optimization and mobilization) support the True North in achieving its goals. To implement the QPM model in its network, the CCSMTL has implemented a visual performance management system (i.e., control rooms) encompassing a strategic decision room, tactical rooms and visual stations. (Lagacé & Landry, 2016). By definition, a control room is a dedicated space where decision-makers meet regularly to take a look on the current state and initiate discussions to improve future performance. The rooms are hier-

archically structured and allow decision makers to delegate tasks to a lower decision-making level or to request support from a higher level.

However, implementing the QPM model is very challenging for the CCSMTL managers. First, the CCSMTL is a very large network, with 28 different services provided to the customers in several institutions. QPM deployment must be performed at various decision-making levels (strategic, tactical and operational) and network structures (programs, departments, institutions, etc.). Given the diversification of the services offered, this deployment is difficult to achieve. Second, some sub-dimensions of the QPM are difficult to measure. Thus, identifying relevant performance indicators is complex. Third, in order to measure the overall performance of a department or the CCSMTL as a whole, managers need aggregated information that is easy to interpret and visualize to efficiently support decision-making. Additionally, some indicators are interdependent while others may be conflicting (in some cases, trade-offs are inevitable). Finally, several indicators have heterogeneous units of measurement.

The objective of this project is to support the CCSMTL managers to efficiently implement the QPM model. More precisely, the objectives are twofold:

1) Identify, select and validate performance indicators relevant for each dimension of the QPM.
2) Measure the overall performance of a structure within the CCMTL (e.g., a department), and translate it into information that is easy to interpret and visualise.

To this end, we propose a framework for developing a performance measurement system (PMS) aiming at implementing the QPM model. The remainder of this article is organized as follows: the next section presents our literature review. Section 3 describes our methodology. Section 4 presents a case study and our preliminary results. Finally, section 5 presents our conclusions, the limitations of our study, and future work.

2 LITERATURE REVIEW

2.1 Performance measurement

According to Marin (2020), a PMS is needed in healthcare first to see how things works and plan performance improvement. Second, it is useful to make the right decisions and monitor the organization. Third it promotes the quality of services. Finally, it supports strategic planning and resource allocation. The measure the performance, the author mentions three generations of measurement systems, the first one is based on balanced measurements such as the balanced scorecard (BSC) of Kaplan and Norton (1992), the perform prism of Neely et al. (2002) and the Skandia navigator model developed by Edvinsson and Malone (1997). The second generation of systems intends to map flows and transformations of the strategy such as the strategy map of Kaplan and Norton (2000), the success and risk maps of Neely et al. (2002) and the IC-Navigator model of Roos et al. (1997). The third generation proposes improvements to the models of the other two generations, especially on how to link the financial and non-financial aspects.

The Supply Chain Operations Reference (SCOR) model (APISC, 2017) presents "the performance" as a grouping or a categorisation of metrics used to express a specific strategy. According to IRIS (Research and socioeconomic information institute) (Hébert & Hurteau, 2016), an indicator is the final deliverable of a data collection for the purpose of achieving a goal. Thus, an indicator must be associated with a precise and measurable objective. In the literature, authors classify performance indicators based on different categorisations. For instance, we can differentiate the indicators by their "external" or "internal" character (Hébert & Hurteau, 2016). According to the authors, internal indicators (activity metrics) are closely linked to the activity of the department or the company. In healthcare, the internal indicators are those which are used to measure and manage activities, practices and resources within the system. External indicators (impact metrics) concern the impact of actions on the market. In healthcare, external indicators show the impact of a health service on its customers (e.g. complaint rate). IRIS proposes another categorisation: 1) health status indicators, which can be expressed positively (e.g. cancer survival rate) or negatively (e.g. mortality rate); 2) resource indicators that are expressed as a function of costs (e.g. health expenditure per person) or not (e.g. number of nurses); and 3) indicators related to the services rendered (e.g. number of surgeries). Merchant (2006) discusses how to choose a set of measures in order to evaluate general managerial performance. In his paper, several other references are presented, which could support choosing the right indicators. From this paper and further readings, we identified the following eight criteria for choosing a performance indicator: validity, relevance, reliability, sensitivity, simplicity, usefulness, sustainability, and specificity.

2.2 Normalisation techniques

Normalization consists in making an entire set of values have the same measurement scale, in order for instance to compare them. Goyal et al. (2014) published an article where they report the three most commonly used techniques. The first one is the min-max normalization. It performs a linear transformation on the original data. Assume that an attribute **A** varies between a minimum **(min)** and a maximum **(max)** value. The method plots a value $\mathbf{X_{real}} \in \mathbf{A}$ to $\mathbf{X_{norm}}$ in the range of **[Nmin, Nmax]** (New min-max) by calculating:

$$X_{norm} = (Nmin - Nmax)\frac{X_{real} - min}{max - min} + Nmin \quad (1)$$

The second is the Zero-Score (Z-Score) normalization. It is used when the range of an attribute is unknown. It transforms the data by converting the values to a common scale with an average of zero and a standard deviation of one.

The third method is the decimal scaling normalization. The value of $\mathbf{X_{norm}}$ is obtained by using the following equation:

$$X_{norm} = \frac{X_{real}}{10^z} \quad (2)$$

Where z is the smallest integer such that Max ($|\mathbf{X_{norm}}|$)<1.

To ensure a better normalization, it is necessary to detect outliers in the data to normalise and eliminate them. This step is primordial to ensure reliable normalised values. According to Al Shalabi et al. (2006), future data can be normalised in the same manner as current data.

2.3 Aggregation and MCDM techniques

Multiple criteria decision-making (MCDM) tools are a set of techniques allowing managers and researchers to choose the best possible decision or option. They represent an important science section of Operational Research. Two main schools are known: the American school with the models of Saaty, Brown and Keeney & Raiffa, and the European school with the models of Roy, Brans, Mareschal and many others. Mena (2000) described the bases of different MCDM techniques and their uses. The author presented a classification of these techniques according to three main approaches: complete aggregation, partial aggregation, local and iterative aggregation. Complete aggregation methods consider all the alternatives and a weight is assigned to each one of them. Partial aggregation methods create a ranking relationship between the alternatives. These approaches do not necessarily lead to the best result as generally expected (Mena, 2000). Iterative and local aggregation methods are used when there are many or unlimited choices. Table 1 presents the most used MCDM techniques.

Complete	Partial	Iterative and local
AHP (Saaty, 1971) MAUT (Ralph Keeney, Howard Raiffa, 1960) Brown and Gibson (P. Brown, D. Gibson, 1972) (MACBETH) (C. Bana, 1992) WPM (Percy Bridgman,1922)	ELECTRE (Bernard Roy, 1968) MELCHIOR Promethee (Brans, Vincke, 1980) QUALIFLEX (Ancot, Paelinck, 1982) NAIADE PAMSSEM	Branch and Bound. Goal programming. STEM (Benayoun, 1969) Ziont-Wallenius (S. Zionts, 1974).

Table 1: MCDM approaches examples

The most used approach among complete aggregation methods is the Analytic Hierarchy Process (AHP) (Saaty, 1971) developed by Saaty in the 1970s and improved in the following years. AHP is a well-known method for structuring and analysing complex decisions, based on human intuition and mathematical modelling. Forman and Gass (2001) explain in their article the effectiveness of the AHP method by giving descriptions of successful applications. They developed a relevant academic discourse to compare the AHP method with other competing approaches. The authors illustrate AHP's applications in various fields such as quality management. The main use of AHP is for solving choice problems in multi-criteria environments and it converts individual preferences into weights.

AHP has been successfully used in performance management for prioritizing and weighting performance indicators (Yaghoobi & Haddadi, 2016). Also, it is widely applied within the BSC framework (Anjomshoae et al., 2019; Modak et al., 2019; Yaghoobi & Haddadi, 2016). In the health sector in particular, AHP is integrated with the BSC for performance evaluation, for instance, Chan (2006) applies the AHP method on hospital balanced scoreboards to identify overall measures to compare performance between healthcare organizations. Regragui et al. (2018) combined the BSC and the AHP to develop a framework for evaluating the performance in hospitals and provide managers with indicators on the strengths and weaknesses of the organisational performance. Other authors such as Leksono et al. (2019) ans Marcarelli (2017, 2018) also used AHP and BSC in healthcare.

3 METHODOLOGY

3.1 Data gathering

Data was collected in order to understand the internal processes of the CCSMTL and its current situation regarding the implementation of the QPM model (indicators selected, reference models used, etc.). We used two methods for gathering information: reviewing relevant documents, for e.g., provided by the CCMTL; and observation/interviews.

3.1.1 Document review

The CCSMTL attempts to adopt the best practices of several Canadian and international organisations to implement its QPM model. It also uses the guidelines and recommendations of the Law on Health and Social Services of the MSSS. According to the ministerial reference framework for performance evaluation (MSSS, 2012), the Law provides a model for organising the human, material and financial resources in a way that encourages the participation of all actors and promotes responsibility sharing between all stakeholders. Moreover, the Law states that healthcare institutions must obtain health and social services accreditation. In 2017, the MSSS selected the services of "Accreditation Canada" for all the institutions in the Quebec network. Accreditation Canada assesses organizations against standards developed by the Health Standards Organization (HSO). Furthermore, it recommends a set of performance management practices to be implemented using a guide-book on the evaluation of quality improvement and quality indicators (Agrément-Canada, 2014). The CCSMTL is also a member of francophone PLANETREE (Cosgrove, 1994), which is a grouping of health and social services institutions aiming at improving healthcare and social services. PLANETREE provides a model for integrating clinical and management practices centred on the customer. Hence, MSSS, Accreditation Canada, and PLANETREE

all provide several references for selecting performance indicators and implementing a performance management system. The documents studied constitute the first step towards the implementation of the QPM.

3.1.2 Interviews and observations

At the beginning, we had limited information on the problem. Therefore, to gather more information, we conducted interviews with CCSMTL experts. Five steps were followed for each interview. i) Set a specific goal for the interview. The main goal, which is common to all interviews, was to evaluate the implementation progress of the QPM model within the CCSMTL. ii) Choose the interview method. According to DiCicco-Bloom and Crabtree (2006), there are three types of interviews: structured, semi-structured and unstructured interviews also called in-depth individual interviews. We adopted the structured interview method. In this method, the participants have a number of structured questions, which they are asked to answer in their own way. iii) Recruiting the participants. We chose the interviewee based on the study needs and progress. We collaborated with a manager involved in the implementation of the QPM who helped us to identify participants who would be interesting for the study. iv) Conducting the meeting, and planning other interviews with the participants if necessary. Examples of questions discussed in the interviews are what are the strategic objectives? What are the practices put in place to achieve these objectives? How the QPM can lead to a better performance? And how does the CCSMTL evaluate the organizational performance? v) Information analysis and result formulation. 10 interviews in total were conducted with 12 senior managers and stakeholders of the CCSMTL, from May 2019 to February 2020. Most of the meetings were one-to-one.

The main objective of the observations was to gather data and identify behaviours and practices that might not be collected otherwise (e.g., interviews). We participated in the QPM Coordination Committee and the QPM Advisory Committee meetings. The Coordination Committee is formed of a limited number of managers from the quality, ethics, organisational performance Department. Its mandate is to ensure successful implementation the QPM in the CCSMTL in accordance with the MSSS strategic plan. Periodically, the Coordination Committee invites the heads of all departments to discuss decisions to be made and collect their feedback. This enlarged group forms the QPM Advisory Committee. Besides, we attended a training on performance improvement led by two managers of the CCSMTL. We also visited two hospitals, two rehabilitation centres and several control rooms.

3.2 Data analysis

Through the interviews, field visits, attendance at meetings and events, we collected a large volume of information. In order to identify the strengths and weaknesses related to the current implementation of the QPM model, we used the SWOT model (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats). According to Pickton and Wright (1998), SWOT analysis is a tool from which strategies can be developed and which improves organisational performance. It involves the collection and representation of data related to internal and external factors that have, or may have, an impact on the organisation. The SWOT analysis method helps to clarify the strengths to be maintained, the weaknesses to be improved, the opportunities to be taken advantage of, and the constraints to be respected. In the following paragraph, we present our main results and findings (Table 2). These results were discussed and validated with CCSMTL experts.

Table 2 shows that there are enough indicators in the CCSMTL that measure quality-accessibility (Strengths). Some of them are dependent with each other while others may be conflictual (Weaknesses). However, we observed a lack of indicators within the customer dimension (Weaknesses), which is yet the heart of the QPM model and the most important component. We also had difficulties in finding indicators in the optimization dimension while most of mobilization indicators are measured by the human resources (HR) department (Weaknesses). We observed that the QPM model is rather well implemented at the strategic level compared to operational or tactical levels (Strengths). There is a major interest of senior managers in orienting the employees to use the QPM. However, up to now the QPM is not much used by the employees. Another interesting finding is that the majority of the indicators are used to meet administrative objectives that respond to ministerial constraints (Threats). These indicators do not meet all the objectives of the QPM. There are several practices to ensure service quality and customer satisfaction, but there is a lack of indicators measuring these aspects. We observe the absence of an indicator performance system. Each department/program measures its own indicators independently of the other departments/programs or the higher hierarchical level. However, department managers can propose other indicators according to their needs (other than the indicators proposed by senior managers and MSSS). Senior managers need to exanimate the performance state in a specific department without having to check all associated indicators. This is not possible with the current performance measurement system. We also find that sometimes the indicators are not related to the established priorities and their primary objectives.

	Strengths	Weaknesses
Internal	- Sufficient number of quality-accessibility indicators. - Most mobilization indicators are centralised at HR department. - MQP is well implemented at the strategic level.	- Lack of overall indicators. - Interdependent indicators. - Some indicators are not linked to a specific goal. - Lack of customer dimension indicators.

	- Several practices ensuring service quality are implemented. - Departments are free to suggest other indicators.	- Few indicators in optimization and mobilization dimensions. - Lack of QPM use at the operational level. - Inadequacy between the QPM dimensions and the indicators used in practice. - Lack of impact indicators.
External	Opportunities	Threats
	- Several performance models and practices are proposed by institutions such as Planetree, Accreditation Canada, MSSS, etc.	- Ministerial constraints. (Strategic Plan 2015-2023)

Table 2 : SWOT analysis for the CCSMTL

3.3 Performance measurement system proposed

Based on the previous analysis, we developed a performance measurement system following an approach revolving around five main phases: (You will find the parameters list in the appendix).

- *Phase1: Structuring an indicator system*

In order to have a full picture of the performance, we need to have overall indicators built from several measures, from the operational to the strategic level. This requires having a network of interrelated indicators known as performance measurement system (Speklé & Verbeeten, 2014). This phase aims to shape the overall structure of this indicator system. it presents an organigram for an organisation with hierarchical structure that have **N** hierarchical levels, assuming that each department $\mathbf{D(hdep)_{jk}}$ has an hierarchical level **j** vis-à-vis the main headquarters $\mathbf{D()_{j=1}}$ and a number **n(hdep)** of sub-departments indexed with the letter **k**. The sub-department **D(hdep)** takes the index **(hdep)** as (higher-department) that refers to the department name of the higher hierarchical level. For example, $\mathbf{D(rehabilitation)_{4,2}}$ is the second sub-department under the department rehabilitation and of a hierarchical level 4.

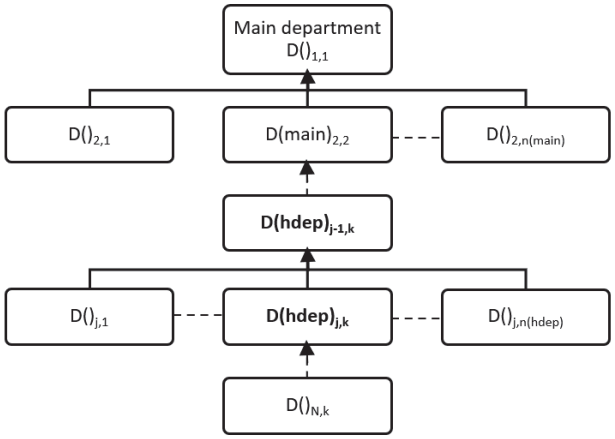


Figure 2 hierarchically structured organization design

- *Phase2: Proposing performance indicators*

In this phase, the literature review is used to select indicators that meet a number of criteria (see Section 2). In collaboration with CCSMTL experts and stakeholders, the appropriate indicators were chosen for each department using the balanced score card (BSC) approach (Kaplan & Norton, 1992). First, we created the appropriate strategy map (Kaplan & Norton, 2000) for the CCSMTL by taking into consideration the QPM dimensions (each QPM dimension is equivalent to one of the BSC axes). Second, based on these strategic objectives, we identified indicators for each QPM dimension as well as the data collection method needed for each indicator. Sometimes, we chose existing indicators and other times we proposed new ones. Finally, the validity of each indicator was checked against the following eight criteria (mentioned in Section 2):

1- Validity (measurable): the indicator measures the results.
2- Relevance: the indicator is associated with an objective.
3- Reliability: the indicator is coherent with the program.
4- Sensitivity: the indicator is sensitive to changes.
5- Simplicity: information is easy to collect and to analyse.
6- Usefulness: the information is useful for decision-making.
7- Specificity: the indicator allows to locate the problem and facilitates the choice of corrective actions.
8- Sustainability: the indicator remains relevant over time.

- *Phase 3: Indicator normalization:*

This phase allows us to put on the same scale indicators having different measurement units (cost, time, number, etc.), that are calculated differently or having different targets (e.g., emergency wait time and consultation wait time). The normalization purpose is to make very different indicators comparable with each other in phase 4.

To this end, we adopt the min-max normalization because we can distinguish the minimum and maximum limits in our data. To do so, we use Equation (1) (Section 2). We adjust the equation's parameters according to our need as follows:

$$Xi_{\%} = 100 \times \frac{Xi_{real} - min_i}{target_i - min_i} \quad (3)$$

$Xi_{\%}$: the normalised value of the indicator i expressed in percentage.
Xi_{real} : the real measured value (before normalization).
min_i : the worst value of the indicator i (before normalization).
$target_i$: the value to be achieved for the indicator i (before normalization).

In other words, we set [Nmin, Nmax] = [0,100] to express the normalised values as percentages.
In some cases, the minimum value is the best and the maximum value is the worst (e.g. the waiting time expected to be as low as possible). In these cases, the worst value is considered as the maximum and the best value as the minimum. In most cases, the historical minimum is not a significant value. For example, if there are falls in the historical data such as a very high demand following a disaster. In those cases, we chose the minimum as the worst value after outliers' elimination to obtain a logical and acceptable value. Finally, to ensure continuous improvement, we chose the maximum value as the target to reach. This allows us to measure the progress toward a specific goal.

After phase 2 and phase 3, each department $\mathbf{D()_{jk}}$ identify and normalize a set of indicators for each dimension **(dim)** of the QPM. we call them internal indicators $\mathbf{X_{i\%}^{dim}} = (\mathbf{X_i^C}, \mathbf{X_i^A}, \mathbf{X_i^M}, \mathbf{X_i^O})$, where $\mathbf{X_i^C}$ designates the set of internal indicators for the customer dimension, $\mathbf{X_i^A}$ for accessibility quality dimension, $\mathbf{X_i^M}$ for mobilization dimension and $\mathbf{X_i^O}$ for optimization dimension.

- *Phase 4: Indicator weighting*

In this phase, weighting the indicators at the same level within one dimension is performed. We chose the AHP method. According to Kumar et al. (2017) AHP is the most popular MCDM method due to its simplicity in procedure. AHP allows us (easily) to weight the indicators without having to make a choice between them.
Basically, AHP is a decision-making tool in a multi-criterion environment that follows five steps. First, model the complex problem in a hierarchical structure that contains the choices and the criteria. Second, weight the elements of the hierarchy by making a set of judgements based on pair-wise comparisons of the elements (using comparison matrix). Third, check the consistency of these matrices, this step is clearly described by Brunelli (2014). Fourth, calculate the weights for the choices and finally, prioritize choices according to their weights.
In our case we use step two, three and four of the AHP method that allows us to weigh the indicators. First, for every department $\mathbf{D()_{jk}}$ we draw 4 matrices, one for each QPM dimension. Using these matrices, we make the pairwise comparison between the indicators. Second, we check the consistency of these matrices. Finally, we calculate the weights for each indicator. Consistency checking and weights generation is done by following algorithms in AHP, for this purpose, we have developed a computer tool using VBA language to roll out these algorithms.

AHP offers flexibility by using pairwise comparison matrices. The size of a given matrix corresponds to the number of indicators chosen in phase 2 $\mathbf{(Xi_{real})}$ and normalised in phase 3 $\mathbf{(Xi_{\%})}$ for one dimension of the QPM**.** The managers in each department are responsible for comparing the indicators and filling the matrices. Next, the coherence of the matrices is checked. If the comparisons are coherent, the weighting coefficients **(Wi)** are generated, if not, the pairwise comparisons are repeated. Finally, a performance index ($\mathbf{PI^{dim}}$) that measures each dimension **(dim)** of the model is calculated for each department $\mathbf{D()_{jk}}$ as follow:

$$PI_{jk}^{dim} = \sum_i^N Wi \times Xi_{\%} \quad (4)$$

PI_{jk}^{dim} : Performance index per dimension **(dim)**
Wi : The weight associated to each indicator
$Xi_{\%}$: Internal indicators

- *Phase 5: Indicator aggregation*

Using equation (4), each department $\mathbf{D()_{jk}}$ in level **j** will have four performance indices that evaluate the four dimensions of the QPM $\mathbf{(PI^C,PI^A,PI^O,PI^M)_{jk}}$ (one per dimension). Then, these indicators are transferred to the higher department $\mathbf{D()_{j-1,k}}$ in the level **j-1.** $\mathbf{D()_{j-1,k}}$ measures its internal indicators $\mathbf{(X_i^C, X_i^A, X_i^M, X_i^O)}$. Next, we weigh the internal indicators and level **J** indicators together in the same way as in phase 4 (Figure 3). Finally, the department $\mathbf{D()_{j-1,k}}$ calculates its own performance indices $\mathbf{(PI^C,PI^A,PI^O,PI^M)_{j-1,k}}$. these performance indices will be transferred to level **J-2** and subsequently until the main department at level **1**.

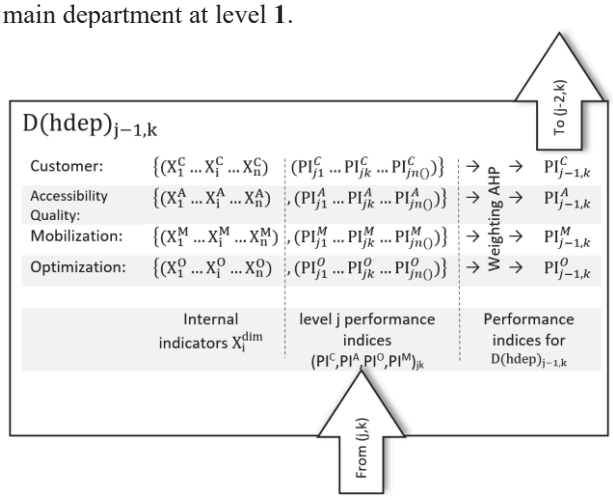


Figure 3 : QPM indicators' calculation in department $\mathbf{D()_{j-1,k}}$

4 CASE STUDY

This section shows how we implemented the performance measurement system that we proposed. The purpose of this case study is to:
- Simulate our approach under real conditions
- Verify the applicability of this method
- Detect the weaknesses to be corrected and improve the approach.

Given the large size of the CCSMTL, we have chosen a particular department referred to as **DI-TSA-DP**, It hosts 2200 customers and processes approximately 10,000 service demands annually, mainly in the South-Central territory of Montreal and in the whole province of Quebec. 2150 employees and 58 doctors work in this department.

DI-TSA-DP contains three principal sub-departments: sub-department **DI-TSA** provides care for customers with an intellectual disability or an autism spectrum disorder, sub-department **DP** provides care for customers with physical disability and sub-department **RMVS** offers rehabilitation services in substitute living environments like in nursing homes for the elderly.
We started the implementation process by collecting data on DI-TSA-DP department. To do so, we planned five meetings and visits with the managers of DI-TSA-DP to present our approach, gather information on the department and sub-departments to illustrate our approach. Since it is not possible to entirely apply the approach on DI-TSA-DP in a short time (all data was not available at the moment of writing this article), we have selected three sub-departments (in three successive hierarchical levels) to illustrate our approach.

The SWOT analysis results (Section 3.2) are particularly valid for DI-TSA-DP. The QPM model is implemented in a very superficial way. DI-TSA-DP does not measure the performance in relation to each dimension of the model and there is no well structured performance measurement system that allows QPM model implementation.

Currently, DI-TSA-DP has installed its main tactical room and tactical rooms in each of the sub-departments (DI-TSA, DP, and RMVS). Similarly, they are deploying the operational rooms for all team units. In certain units, these control rooms are not fully implemented. So, each unit has a deployment rate of its control room. According to this deployment rate, we have chosen to work on **DP** sub-departments. DP also contains three sub-departments: **AT** sub-department which allows the customers with a physical disability to obtain specialized assistant devices (prosthesis, wheelchair, etc.), **LN** that offers services for people with a physical disability due to neurological or locomotor impairments, and **SL,** which provides care for people with language or sensory disability. we have chosen to work on LN sub-department it has the highest deployment rate. Under LN, there are nine team units, each unit has its own control room. In short, this case study focuses on DI-TSA-DP in the first level then DP in the second level, and finally LN in the third and last level. The five step-approach is applied as follows:

Phase1: Structuring an indicator system
In (Figure 4), we show a simplified organizational chart of DI-TSA-DP department. This organigram shows only the department and sub-departments necessary to illustrate our approach. For example, the LN sub-department named $D(DP)_{3,2}$ is the 2nd sub-department under DP and of hierarchical level 3, with the hypothesis that the department DI-TSA-DP $(D()_{1,1})$ is the main department. Furthermore, we present the 9 team units under the LN sub-department. The figure shows the three decision-making levels. In each level there are the control rooms. For instance, in the tactical level there is a main tactical room for DI-TSA-DP and other sub-tactical (considered as tactical rooms for DI-TSA, DP and RMVS.

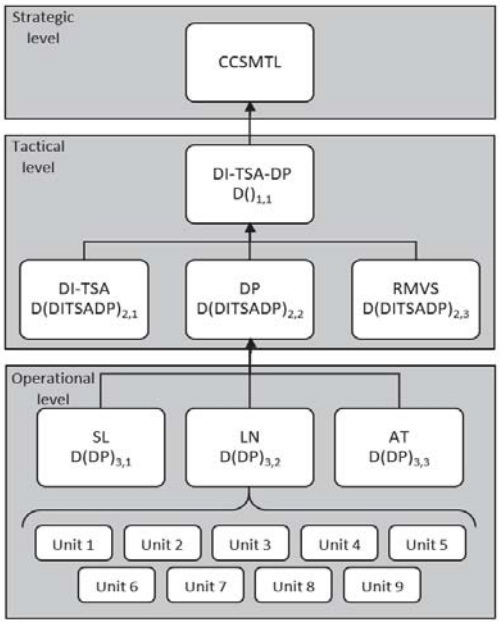


Figure 4 : DI-TSA-DP Reduced Flowchart

- *Phase2: Proposing performance indicators*

In this phase, we planned working meetings of two hours each with managers and stakeholders of each sub-department to choose the performance indicators according to their performance objectives. We started from the operational to the tactical levels. So, we began the meetings first with two of the team units, second with LN, then with DP and last with DI-TSA-DP. Our progress in this meeting process is stopped at the LN sub-department level, also the team units do not use enough indicators that measure all the QPM dimensions. For these reasons, we limit the study on presenting an example in the LN sub-department and then the aggregation process to the higher level in the next phases.

In Table 3, an example of internal indicators ($\mathbf{X_i^{dim}}$) proposed for the department LN ($D(DP)_{3,2}$) is presented. These indicators will be used in the operational room.

LN: $D(DP)_{3,2}$		
Dimension	**Indicator name**	$\mathbf{X_i^{dim}}$
Customer	Customer satisfaction rate	X_1^C
	Complaint rate	X_2^C
Accessibility Quality	Bed occupancy rate	X_1^A
	Respect of access deadlines	X_2^A
	Average length of stay	X_3^A
Mobilization	Staffing level	X_1^M
	Hours of service (HPS)	X_2^M
	Employee satisfaction rate	X_3^M
Optimization	Reference number change rate	X_1^O
	Project progress rate	X_2^O

Table 3: LN department indicators

Subsequently, we checked the validity of each indicator using the eight criteria presented earlier in section 3.3 (Validity, Relevance, Reliability, Sensitivity, Simplicity, Usefulness, Specificity, Sustainability). Sometimes, an

indicator does not satisfy the totality of these criteria, in this case, either we change it with another indicator or we try to solve this lack in criteria. For example, some indicators were not "simple" because we do not have the means to collect the necessary information. So, we try to find if we can get the information in other ways: audits and consultations, reports (accidents/incidents), computer tracking system, surveys, balance sheets (e.g. financial reports). These are the methods of data collection in DITSA-DP.

- *Phase 3: Indicator normalization*

We use the indicator Average length of stay (X_3^A) to present the normalisation method (Table 4). For confidentiality reasons, the values in the following tables are not the real values measured at LN department, but modified ones.

Indicator:	X_3^A: Average length of stay (DMS)
Real value ($\mathbf{X_{3\,real}^A}$):	17 days
Target:	10 days
Min (worst value):	50
Normalized value ($\mathbf{X_{3}^A}_{\%}$):	$X_{3\,\%}^{A} = 100 \times \frac{X_{3\,\mathbf{real}}^{A} - \min}{\text{target} - \min} = 82.5\%$

Table 4: A3 indicator normalisation

In the same way, using equation (3), we calculated all the normalised indicators (Table 5).

	X_1^C	X_2^C	X_1^A	X_2^A	X_3^A	X_1^M	X_2^M	X_3^M	X_1^O	X_2^O
$X_{i\%}^{dim}$ (%)	85	93	91	86	82.5	92	81	87	80	92

Table 5: LN Normalized indicators

- *Phase 4: Indicator weighting*

In this phase we do the weighting using the pairwise comparison matrices of the AHP method. These matrices must be filled in with the responsible of each sub-department during the meeting. Thus, the following are fulfilled with LN's manager:

Customer:

	X_1^C	X_2^C
X_1^C		2
X_2^C	1/2	

Accessibility/Quality:

	X_1^A	X_2^A	X_3^A
X_1^A		1	4
X_2^A	1		5
X_3^A	1/4	1/5	

Mobilization:

	X_1^M	X_2^M	X_3^M
X_1^M		1/2	1/2
X_2^M	2		1
X_3^M	2	1	

Optimization:

	X_1^O	X_2^O
X_1^O		3
X_2^O	1/3	

Figure 5: Pairwise comparison matrices for LN

Then, we enter our matrices on a Visual Basic for Excel application that we developed. This application checks the consistency of these matrices and generates the weights using the AHP algorithm.

	X_1^C	X_2^C	X_1^A	X_2^A	X_3^A	X_1^M	X_2^M	X_3^M	X_1^O	X_2^O
Wi	2/3	1/3	0.43	0.46	0.1	1/5	2/5	2/5	3/4	1/4

Table 6 : weights for indicators of LN department

In some cases, the weighting is done intuitively, for example for the customer dimension $\mathbf{X_1^C}$ is twice as important than $\mathbf{X_2^C}$, so intuitively we can deduce that $\mathbf{W_{C1}=2/3=2\times W_{C2}}$. Last and not least, we calculate a performance index $\mathbf{PI_{32\%}^{dim}=(PI^C,PI^A,PI^O,PI^M)_{32}}$ that measures each dimension of the model using equation (4):

	X_1^C	X_2^C	X_1^A	X_2^A	X_3^A	X_1^M	X_2^M	X_3^M	X_1^O	X_2^O
Wi	2/3	1/3	0,43	0,46	0.1	1/5	2/5	2/5	3/4	1/4
$X_{i\%}^{dim}$	85	93	91	86	82.5	92	81	87	80	92
$PI_{jk\%}^{dim}$	PI_{32}^{C}=87,6		PI_{32}^{A}=87,7			PI_{32}^{M}=85.6			PI_{32}^{O}=83	

Table 7: Performance indices of LN sub-department

- *Phase 5: Indicator aggregation*

Each sub-department in level 3 $\mathbf{D(DP)_{3,k}}$ will follow the same steps of phase 1, 2, 3 and 4 to get its performance indices. the following indicators will be calculated in SL, LN and AT:

SL D(DP)$_{31}$	LN D(DP)$_{32}$	AT D(DP)$_{33}$
$PI_{31}^{c}, PI_{31}^{A}, PI_{31}^{M}, PI_{31}^{O}$	$PI_{32}^{c}, PI_{32}^{A}, PI_{32}^{M}, PI_{32}^{O}$	$PI_{33}^{c}, PI_{33}^{A}, PI_{33}^{M}, PI_{33}^{O}$

Table 8: Performance indices of level 3 sub-department

Now, these latter indicators will be aggregated to the higher hierarchical level: sub-department **DP** (D(DITSADP)$_{2,2}$). Also, DP department measures its own internal indicators. To make the case study more clear, we assume that the DP internal indicators are: $\mathbf{(X_1^C, X_2^C, X_1^A, X_2^A, X_1^M, X_2^M, X_1^O, X_2^O)}$. Thus, the whole indicators used in DP sub-department are: [(internal indicators of DP)+(level 3 performance indices)]. These indicators are then weighed together as in phase 4. Next the performance indices $\mathbf{PI_{22\%}^{dim}=(PI^C,PI^A,PI^O,PI^M)_{22}}$ are calculated using equation (4) the as follows:

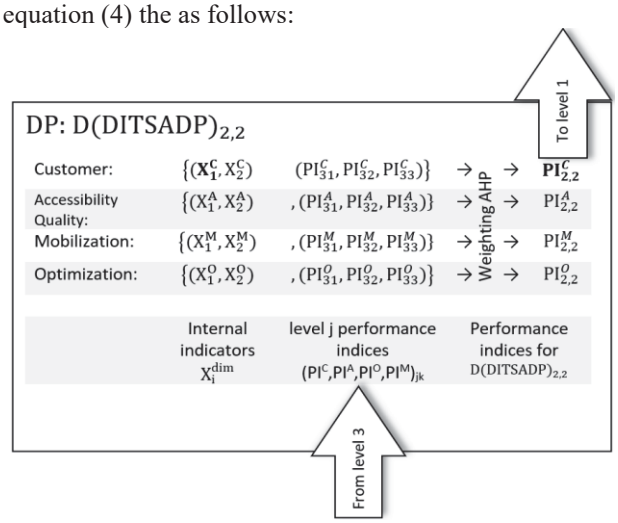


Figure 6 : QPM indicators' calculation in DP department

Finally, the 5 phases are done for the other departments in the same way until reaching the first hierarchical level.

To summarise, first, based on the control rooms deployment rates, we have chosen 3 successive sub-departments (DI-TSA-DP, DP, LN) with which we start our approach. Second, we organised meetings with managers from different hierarchical levels. The purpose of these meetings is to identify performance indicators according to the criteria presented in phase 2, and then gather information on the selected indicators (Value, target, min etc.) and make the pairwise comparisons. To this end, we used an indicators' selection sheet which includes indicators matrix, criteria verification matrix, and four pairwise comparison matrices (one for each dimension). Third, we inserted the collected data in a computer tool that we developed using VBA language on Excel. This tool allows to normalise the selected indicators according to phase 3 instructions, to weight indicators according to pairwise matrices and phase 4 steps, to aggregate indicators using phase 5 steps and to calculate and display the performance indices.

5 CONCLUSION

The CCSMTL has developed its quality performance model (QPM model) based on four dimensions (Customer, Quality-accessibility, Mobilization, Optimization). Our project aims to support the implementation of this performance model. To this end, after a SWOT analysis based on collected data, we proposed a five-based approach. The first phase aims to understand the overall structure of the measured system. The second phase support the decision-makers in selecting relevant performance indicators. In the third phase, the indicators are normalised. In the phase 4, AHP method is used to coare and weight the indicators. The last phase consists in aggregating and calculating overall indicators (performance indexes) for each QPM dimension.

Our approach will support the CCSMTL to efficiently implement its QPM model. First, it provides a scorecard that contains a well-structured and understandable indicator system that allows managers to visualise the overall performance in each department and sub-department without having to check several indicators that are not meaningful at the strategic level. Second, managers will be aware of the importance of having performance indicators linked to the four dimensions of the QPM model, starting from their strategic objectives. Third, our approach promotes an organisational culture focused on a quality-performance model and allows departments to compare themselves in a way that fosters a competitive spirit. The following is testimony of a senior manager of the CCSMTL regarding the proposed approach: "The structured interviews enabled the research team to fully understand the organisation's QPM model and to develop accordingly the solution approach. The data structure proposed is highly relevant in that it addresses both the dimensions and sub-dimensions of the QPM model and is is adapted to the hierarchical structure of the CCSMTL. The rigorous process of indiactor validation and weighting carried out with stakeholders ensures a better reliability of the indicators developed, which will optimise their use to eventually support decision-making.".

This study presents some limitations. First, it does not consider the negative effects of indicator aggregation to create performance indexes. Second, a considerable effect is the interdependency between the indicators. Other approaches can address this problem such as ANP (Analytic Network Process), which is a general form of the AHP method, (Saaty, 1996). These limitations present interesting avenues for further work. Currently, we focus on using the BSC and strategy map (Kaplan & Norton, 2000) to create a more coherent and balanced performance measurement system.

APPENDIX

Parameters list:

i	:	Index for the indicators
j	:	Index indicate the hierarchical level $j \in [1..N]$
k	:	Index designates the order of sub-department $k \in [1..n(hdep)]$
$D(hdep)_{jk}$	:	The j'st sub-department under higher-department (hdep) and in hierarchical level k
Xi_{real}	:	Real internal indicators
$X_{i\%}^{dim}$	:	Normalized internal indicators in dimension (dim)
Wi	:	Weight associate to Indicator i
PI_{jk}^{dim}	:	Performance index in department D()jk and the dimension (dim)

ACKNOWLEDGMENTS

We acknowledge the MITACS Globallinks program, the CCSMTL and École de technologie supérieure (ÉTS) for funding this research. We are grateful to Mr. Jacque Drolet and all CCSMTL managers and employees who collaborated in the project.

REFERENCES

Agrément-Canada. (2014). *Guide sur l'évaluation de l'amélioration de la quali-téet les indicateurs de qualité.*

Al Shalabi, L., Shaaban, Z., & Kasasbeh, B. (2006). Data mining: A preprocessing engine. *Journal of Computer Science, 2*(9), 735-739.

Anjomshoae, A., Hassan, A., & Wong, K. Y. (2019). An integrated AHP-based scheme for performance measurement in humanitarian supply chains. *International Journal of Productivity and Performance Management*.

APISC. (2017). *Supply Chain Operations Reference (SCOR) Model Version 12.0*.

Brunelli, M. (2014). *Introduction to the analytic hierarchy process*. Springer.

CCSMTL. (2017). *Le Rapport annuel de gestion 2016-2017 « dévoués à LA QUALITÉ ET à LA PERFORMANCE »*.

Chan, Y. C. L. (2006). An analytic hierarchy framework for evaluating balanced scorecards of healthcare organizations. *Canadian Journal of Administrative Sciences/Revue Canadienne des Sciences de l'Administration, 23*(2), 85-104.

Cosgrove, T. L. (1994). Planetree health information services: public access to the health information people want. *Bulletin of the Medical Library Association, 82*(1), 57.

DiCicco-Bloom, B., & Crabtree, B. F. (2006). The qualitative research interview. *Medical education, 40*(4), 314-321.

Edvinsson, L., & Malone, M. (1997). Realizing your company's true value by finding its hidden brain power. *Intellectual Capital*.

Escudero Marin, P. (2020). *Using agent-based modelling and simulation to model performance measurement in healthcare* Lancaster University].

Forman, E. H., & Gass, S. I. (2001). The analytic hierarchy process—an exposition. *Operations research, 49*(4), 469-486.

Goyal, H., Pokuri, R., Kathula, S., & Battula, N. (2014). Normalization of data in data mining.

Hébert, G., & Hurteau, P. (2016). *les indicateurs en santé*. iris-recherche.qc.ca

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1992). The Balanced Scorecard œ Measures That Drive Performance—, in: Harvard Business Review, January-February 1992. *Putting the balanced scorecard to work*.

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2000). Having trouble with your strategy? Then map it. *Focusing Your Organization on Strategy—with the Balanced Scorecard, 49*.

Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 69*, 596-609. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191

Lagacé, D., & Landry, S. (2016). Salles de pilotage: un nouveau mode de gestion de la performance. *Gestion, 41*(3), 90-93.

Leksono, E. B., Suparno, S., & Vanany, I. (2019). Integration of a Balanced Scorecard, DEMATEL, and ANP for Measuring the Performance of a Sustainable Healthcare Supply Chain. *Sustainability, 11*(13), 3626.

Marcarelli, G. (2017). EVALUATING HEALTHCARE ORGANIZATIONS BY A NETWORK MODEL WHICH INTEGRATES ANP WITH A REVISED-BSC. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process, 9*(1).

Marcarelli, G. (2018). An integrated network model for performance management: a focus on healthcare organisations. *International Journal of Managerial and Financial Accounting, 10*(2), 163-180.

Mena, S. B. (2000). Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *BASE*.

Merchant, K. A. (2006). Measuring general managers' performances. *Accounting, Auditing & Accountability Journal, 19*(6), 893-917. https://doi.org/10.1108/09513570610709917

Modak, M., Ghosh, K. K., & Pathak, K. (2019). A BSC-ANP approach to organizational outsourcing decision support-A case study. *Journal of Business Research, 103*, 432-447.

MSSS. (2012). *Cadre de référence ministériel d'évaluation de la performance du système public de santé et de services sociaux à des fins de gestion*.

MSSS. (2019). *Plan stratégique du ministère de la Santé et des Services sociaux 2019-2023* (978-2-550-85560-6).

Neely, A. D., Adams, C., & Kennerley, M. (2002). *The performance prism: The scorecard for measuring and managing business success*. Prentice Hall Financial Times London.

Pickton, D. W., & Wright, S. (1998). What's swot in strategic analysis? *Strategic change, 7*(2), 101-109.

REGRAGUI, H., Sefiani, N., & AZZOUZI, H. (2018). Improving performance through measurement: the application of BSC and AHP in healthcare organization. 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA),

Roos, J., Edvinsson, L., & Dragonetti, N. C. (1997). *Intellectual capital: Navigating the new business landscape*. Springer.

Saaty, T. (1971). L. 1990. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European journal of operational research, 48*(9-26).

Saaty, T. L. (1996). *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process* (Vol. 4922). RWS Publ.

Speklé, R. F., & Verbeeten, F. H. M. (2014). The use of performance measurement systems in the public sector: Effects on performance. *Management Accounting Research, 25*(2), 131-146. https://doi.org/10.1016/j.mar.2013.07.004

Yaghoobi, T., & Haddadi, F. (2016). Organizational performance measurement by a framework integrating BSC and AHP. *International Journal of Productivity and Performance Management*.

USAGE DES PENALITES DANS LES MODELES ECONOMIQUES DE MANAGEMENT INDUSTRIEL

Najat Bara [1,2], **Frédéric Gautier**[1,2]

[1] EMINES, University Mohammed VI
Ben Guerir, Morocco
[2] IAE Paris, Sorbonne Business School,
Université Paris I Panthéon-Sorbonne, Paris, France
Najat.BARA@emines.um6p.ma
frederic.gautier@univ-paris1.fr
Frederic.Gautier@emines.um6p.ma

Vincent Giard[1,3]

[3] Université Paris-Dauphine, PSL Research University
Paris, France
vincent.giard@dauphine.psl.eu
vincent.giard@emines.um6p.ma

RESUME : *La prise de décision en management industriel fait un appel croissant à des modèles d'optimisation comportant un éclairage économique, et donc privilégiant une performance définie en termes d'efficience. Cet éclairage éco nécessite le recours à un modèle de coûts qui doit être compatible avec l'impact dans le temps et dans l'espace des décisions envisagées. Les conséquences des décisions proposées peuvent compromettre le respect de certains critères d'efficacité du système productif étudié ou de systèmes clients. Pour éviter ces impacts indésirables, de nombreux modèles décisionnels introduisent, dans la fonction économique, des coûts de pénalité qui ne peuvent être obtenus par la comptabilité de gestion. Cet article tente de décrire le rôle et la détermination des pénalités dans ces modèles.*

MOTS-CLES : *Gestion de production, Gestion de performance, Recherche opérationnelle, Modélisation des systèmes, Comptabilité de gestion, Pénalité.*

1 REMARQUE PREALABLE

Cet article présente quelques observations sur le rôle et la définition des pénalités dans les modèles d'optimisation économiques de management industriel que proposés dans de nombreux articles et manuels de management industriel. Il n'est pas question ici de s'interroger sur la pertinence de ce type d'approche d'aide à la décision, ni de produire un état de l'art fondé sur une large revue de littérature. Nous visons plus modestement à formuler quelques remarques méthodologiques et typologiques auxquelles conduisent ces observations. Toutefois, le lecteur est renvoyé à quelques articles illustrant l'usage de quelques types de pénalités peu fréquentes.

2 INTRODUCTION

On s'intéresse ici à un système productif fournissant des produits (terme générique que l'on utilisera ici pour désigner aussi bien des produits que des prestations de service) à des clients, par l'intermédiaire d'un ensemble de ressources matérielles, humaines et informationnelles. Cette définition générale permet d'inclure, notamment, les systèmes dédiés à la production de biens ou de services, et à l'approvisionnement ou la distribution de biens. La modélisation du processus de production d'un système productif est une description formelle des relations entre l'utilisation des ressources de ce système et la fourniture des produits demandées. Le niveau de détail du modèle – sa granularité – varie selon que le modèle vise une prise de décisions opérationnelles, tactiques ou stratégiques.

Dans cette description formelle, que l'on qualifie ici de modèle physique (voir figure 1), les décisions sont représentées par des variables quantitatives (quantité à commander…) ou des variables qualitatives (itinéraire de transport, configuration d'investissement…) transcrites par des variables binaires dans certaines modélisations. Ces variables, qualifiées de *variables de commande*, influencent le fonctionnement du système productif étudié par un ensemble de relations causales plus ou moins complexes qui sont au cœur de la modélisation retenue. Ces mécanismes conditionnent la valeur prise par certains paramètres physiques (niveau de stock, kilométrage parcouru…) retenus en raison de leur impact sur la performance du système de production étudié. Ces paramètres sont généralement qualifiés de *variables d'état* dans les modélisations peu complexes qui mobilisent un nombre restreint de paramètres physiques ; on gardera ici ce vocable quelle que soit la complexité de la modélisation.

Le modèle décisionnel peut s'appuyer uniquement sur le modèle physique en cherchant à optimiser un indicateur d'*efficacité*, calculé à partir d'une ou plusieurs variables d'état et, dans certains problèmes décisionnels, de variables de commande binaires. Le plus souvent, cette approche de la performance est considérée comme insuffisante car elle ne tient pas compte du coût des ressources mobilisées pour satisfaire la demande et qu'il existe souvent plusieurs solutions alternatives ayant la même efficacité mais pas le même coût. Cette vision économique de la performance est qualifiée d'*efficience* et, parmi toutes

les solutions ayant la même efficacité, on a intérêt à privilégier la plus efficiente. La détermination de l'efficience d'une solution passe par une valorisation globale d'une solution obtenue dans le modèle physique (là encore, variables d'état et variables de commande binaires), par un système de coûts fourni par une comptabilité de gestion.

Le modèle décisionnel combine alors (voir figure 1) le modèle physique et le modèle comptable pour trouver la solution qui optimise cet indicateur d'efficience, en prenant en compte la disponibilité des ressources et, parfois, certaines contraintes d'efficacité.

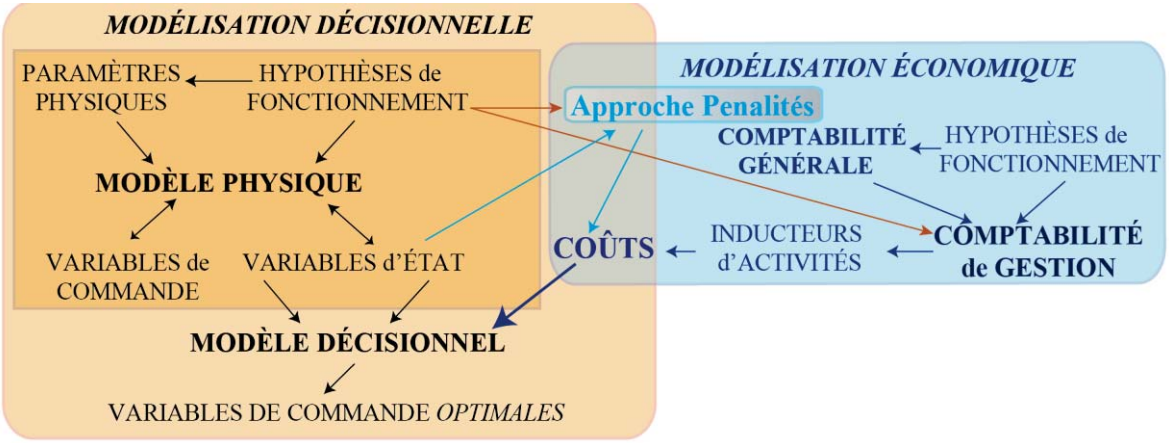


Figure 1 : intégration des pénalités dans les modèles décisionnels s'appuyant sur une évaluation économique

Les coûts fournis par la comptabilité reposent implicitement sur une modélisation du fonctionnement du système productif qui peut être éloignée de celle retenue par le modèle physique pour analyser les conséquences physiques des décisions à prendre, cette discordance pouvant invalider la pertinence de la solution retenue. On reviendra en détail sur ce point.

Par ailleurs, les conséquences de certaines décisions optimales, économiquement fondées, peuvent compromettre les attentes des clients de ce système productif (attentes mesurées par des variables d'état), invalider certaines hypothèses relatives à la demande et remettre en cause la pertinence des décisions proposées par le modèle. Pour éviter cet écueil, certains modèles ajoutent au système de coûts, des pénalités qui ne peuvent pas être tirés de la comptabilité de gestion et qui sont associés à des variables d'état que l'on cherche à « contenir » dans la recherche de l'optimum. Ces pénalités sont des coûts et donc logiquement intégrées dans la partie modélisation économique de la figure 1, adaptée de (Giard, 2017).

L'objectif de cet article est de décrire les contextes dans lesquels ces pénalités sont prises en compte et leurs déterminations. Pour ce faire, il est nécessaire de préciser les caractéristiques des représentations physiques sous-jacentes dans la modélisation décisionnelle (section 2). Ceci permet de distinguer le cas des pénalités associées à la défaillance du système étudié se trouvant dans l'incapacité de répondre complètement à la demande (section 3), de celles qui sont associées à un critère d'efficacité de certains produits (section 4). Notre article s'achèvera par une rapide conclusion.

3 MODELISATION ET PRISE DE DECISION EN MANAGEMENT INDUSTRIEL

On commencera par examiner les principales caractéristiques du modèle physique utilisé par le modèle décisionnel pour prendre des décisions (§3.1), avant d'examiner rapidement les bases du système de coûts offert par la modélisation économique – principalement la comptabilité de gestion – que le modèle décisionnel combine avec le modèle physique pour proposer la solution la plus efficiente (§3.2).

3.1 Modélisation des processus sous-jacente dans la modélisation décisionnelle

Une modélisation décisionnelle se caractérise principalement par la combinaison de trois caractéristiques : le degré de certitude des informations mobilisées, la réalité du système étudié et la granularité spatio-temporelle retenue.

- Les caractéristiques du système productif et de son environnement sont considérées comme *connues avec certitude* –et le problème décisionnel se pose en univers certain –ou non. Le plus souvent, dans ce dernier cas, ces caractéristiques sont supposées être connues *en probabilité ;* on n'évoquera pas ici le cas de l'univers incertain parce qu'il fait généralement l'objet de traitements spécifiques dans lesquels l'optimisation joue un rôle mineur. Cette caractérisation a un impact sur les techniques de modélisation utilisables. Dans la modélisation en univers aléatoire, les variables d'état deviennent aléatoires. Cette caractéristique conduit à travailler en espérance mathématique dans le cadre de modèles analytiques pour les systèmes fictifs très simples ou, dans les cas plus complexes, à travailler avec l'approche de Monte

Carlo, dans le cadre d'une modélisation sur tableur ou sur simulateur de processus. En univers certain, la programmation mathématique est bien adaptée à la formalisation de problèmes où les relations causales sont simples, la modélisation via un tableur s'imposant dans les autres cas.

- Le système productif étudié peut être *réel ou fictif*. La littérature de la recherche opérationnelle privilégie des systèmes fictifs relativement simples pour établir la *solution analytique* caractérisant la solution optimale d'un problème décisionnel-type (par exemple, gestion d'approvisionnement). Les systèmes fictifs peuvent être plus complexes et posséder un dimensionnement variable conduisant à une *modélisation générique* du problème posé (par exemple détermination d'une tournée de transport) par exemple par la programmation mathématique ou la théorie des graphes et, dans certains cas, conduire à une proposition d'algorithme de résolution spécifique. Un certain nombre de recherches, conduites dans le cadre de contrats industriels, s'intéressent à une problématique décisionnelle se posant pour un système productif réel. Dans ce cas, la modélisation peut conduire à l'évaluation de scénarios décisionnels (*what-if analysis*), à la formulation d'un problème d'optimisation si la complexité est très réduite, à la formulation d'un modèle de simulation ou à un système d'aide à la décision combinant la logique de scénarios avec des optimisations locales et/ou de la simulation. La démarche proposée est souvent suffisamment générique pour être transposable à des systèmes productifs de caractéristiques similaires confrontés aux mêmes problèmes décisionnels.

- La *granularité* retenue dans la modélisation, dans ses dimensions *spatiales et temporelles*, est un élément important de caractérisation de la modélisation décisionnelle. Le temps intervient sous plusieurs aspects : modélisation mono ou multi-période, amplitude de la période et horizon retenu dans le cas multi-période. La granularité comporte aussi une caractérisation spatiale, avec le niveau de détail (ou d'agrégation) des ressources et des produits. La granularité dépend souvent du périmètre du système étudié : en règle générale, la granularité est fine dans l'analyse des décisions opérationnelle (périmètre de modélisation restreint) et plus agrégée dans les autres, à ceci près que beaucoup de décisions stratégiques impliquent de travailler également avec une modélisation fine pour s'assurer de la robustesse de la solution obtenue avec une modélisation agrégée.

3.2 Modélisation implicite des processus sous-jacente dans la modélisation économique

La comptabilité de gestion (au sens large car plusieurs approches sont utilisables) retraite les informations de la comptabilité générale pour mesurer le coût de fonctionnement d'une entité (service, usine…), le coût de production d'une prestation interne (envoi d'un conteneur) et le coût de fabrication d'un produit. Elle a pour objectif d'aider au contrôle. L'établissement de ces coûts pose deux problèmes méthodologiques majeurs ; on se focalisera sur le coût d'un produit mais ces problèmes se posent également pour le coût d'un service.

- Le premier problème est celui de l'*affectation de charges indirectes* aux produits ou entités. Les charges indirectes correspondent à des prestations ou des inputs partagées par plusieurs produits (dépenses énergétiques d'un atelier ne disposant que d'un compteur unique, frais généraux…) et peuvent (ou non) être réparties entre ces produits. Le caractère direct ou non d'une charge est étroitement lié à l'organisation du système productif. La distinction entre coût direct et indirect d'un produit dépend du *niveau d'agrégation retenu* : une charge peut être indirecte au niveau d'une référence élémentaire de produit et devenir directe si l'on raisonne au niveau d'une famille de produits ou d'un ensemble de produits fabriqués dans un même site. Par ailleurs, on est souvent amené à travailler par famille de produits, les produits d'une famille mobilisant les mêmes ressources. Le calcul du coût direct d'un produit fictif représentant une famille est nécessairement un coût moyen pondéré des coûts directs des références de cette famille, où les coefficients de pondération correspondent à une structure moyenne dont la stabilité n'est pas garantie.

  Depuis plus de deux décennies, la *comptabilité par activité* s'est imposée comme une démarche de base en comptabilité de gestion, parce qu'elle permet de diminuer l'arbitraire du traitement des coûts indirects. Son fondement est de remplacer la relation causale directe « les produits consomment les ressources », par la relation causale indirecte « les produits consomment les activités qui consomment les ressources ». Cette approche englobe les autres approches de la comptabilité de gestion qui peuvent s'en déduire ; c'est la raison pour laquelle elle est privilégiée ici. Le concept d'activité est large et ne se focalise pas sur la seule production d'un produit ; elle peut correspondre, par exemple à un lancement d'une série en production. Cette démarche, qui met l'accent sur des *inducteurs d'activité*, permet une définition plus pertinente des coûts utilisés en modélisation décisionnelle.

- Se pose ensuite le problème de l'impact du *niveau d'activité* sur le calcul de ces coûts aussi bien pour les charges directes que pour les charges indirectes (amortissement d'une machine dédiée à une production). On peut partir du niveau d'activité constaté – avec l'inconvénient de rendre difficile des comparaisons dans le temps et dans l'espace – ou choisir de fonder ces calculs sur un niveau d'activité « normal ». Cette dernière solution, généralement retenue, facilite les comparaisons dans le temps (et dans l'espace) mais soulève deux difficultés. Il ne peut exister de définition objective de ce niveau, ce qui est une source possible de contestations, voire de malversa-

tions. La discordance entre le niveau d'activité observé et celui considéré comme normal pose nécessairement un problème de cohérence entre la comptabilité générale et la comptabilité de gestion, la somme des coûts de cette dernière pouvant être assez différente de celle des charges de la comptabilité générale.

Plusieurs solutions existent pour répondre à ces problèmes et permettre le calcul d'un coût partiel ou d'un coût complet. Il n'est pas nécessaire ici de les examiner, ce qui importe c'est la mise en évidence du fait que le coût que l'on utilise dans un système de valorisation est le résultat d'une modélisation du fonctionnement d'un système productif dans laquelle il est fait usage de conventions sur la répartition dans le temps de certaines charges, de conventions sur le niveau d'activité de ce système productif et de conventions sur une éventuelle répartition de certaines charges indirectes reposant sur des relations causales parfois contestables.

Ces coûts sont établis pour être utilisés principalement en contrôle de gestion ; ils ne peuvent l'être sans précaution pour la prise de décisions en management industriel. Dans ce contexte, quelques considérations additionnelles doivent être prises en compte pour définir, à partir des informations fournies par la comptabilité de gestion, des coûts qui soient pertinents dans la perspective décisionnelle retenue. Le principe conducteur est que le système de valorisation doit être tel que les avantages de la décision proposée, par rapport à une décision de référence (qui peut être de ne rien faire), puissent être observables sur les résultats financiers de l'organisation concernée. À cet effet, quelques considérations additionnelles doivent être prises en compte, pour définir un système de coûts pertinent pour l'évaluation des décisions prises en management industriel.

- La comptabilité de gestion est orientée vers la détermination de coûts d'un produit (au sens large, rappelons-le). Un problème décisionnel se pose plutôt en termes de coût d'une décision en comparaison avec une décision de référence (définie par les valeurs retenues pour les variables de commande), pas toujours explicitée. La solution analytique optimale d'un système fictif (règles d'approvisionnement, par exemple) ne considère pas de solution de référence. L'application de cette relation à un cas réel pour améliorer une décision récurrente, fait appel à un système de coûts dont l'intérêt n'est pas seulement de pouvoir déterminer les variables de commande mais aussi de mesurer le gain obtenu en passant de la solution courante à la solution optimale, ce gain ayant pour vocation à se retrouver dans le compte de résultats, faute de quoi cette optimisation est vide de sens. Dans le cas de systèmes réels, une alternative décisionnelle (portant sur un ensemble de variables de commande) s'évalue nécessairement en rapport avec une solution décisionnelle de référence qui peut être de ne rien faire (extension d'usine, par exemple) ou de reconduire l'existant à l'identique (remplacement d'une machine, par exemple). Cette analyse économique comparative porte le nom de *bilan différentiel* et permet d'éliminer toutes les charges inchangées, quelle que soit l'alternative décisionnelle étudiée (Bara et *al.,* 2019). Certaines décisions ont un impact sur les recettes ; on ne traitera pas cet aspect ici car il est évident à prendre en compte dans un bilan différentiel.
- La comptabilité de gestion propose, dans cette perspective de contrôle de gestion, des objets de coûts (produits ou entités organisationnelles) qui peuvent être éloignés des besoins de l'évaluation dans les modèles décisionnels. Les fonctions de coût liées aux variables de décision peuvent ne pas être identifiées dans le système de comptabilité de gestion. Ce constat conduit à vérifier, sur le plan méthodologique, que les fonctions de coûts utilisées ne sont pas trop éloignées de la maille d'analyse retenue par le système de comptabilité de gestion.
- Les économistes ont introduit très tôt la distinction entre coût fixe et coût variable, le coût fixe étant indépendant du volume de production. Ce concept est intéressant dans l'analyse décisionnelle, dès lors que l'on introduit explicitement l'horizon de temps retenu dans la prise de décision et qu'on le généralise à d'autres décisions que celles de la production.
- Ajoutons, pour terminer, que les alternatives décisionnelles étudiées peuvent avoir un impact sur plusieurs périodes, ce qui conduit à utiliser l'actualisation pour synthétiser les variations de flux de trésorerie calculées dans le bilan différentiel pour travailler sur une VAN (Valeur Actuelle Nette).

4 PENALITES ASSOCIEES A LA DEFAILLANCE DU SYSTEME PRODUCTIF

On peut distinguer deux grandes familles de raisons qui sont à l'origine de l'introduction de pénalités dans un modèle décisionnel avec prise en compte d'un éclairage économique, seul cas envisagé ici.

4.1 Rétroaction possible de la solution sur les paramètres du modèle

Les modèles génériques qui traitent de systèmes *fictifs* proposent des solutions génériques, définies en régime de croisière, qui sont souvent utilisées pour apporter des solutions opérationnelles à des problèmes *concrets*. Ces modèles reposent tous implicitement sur l'hypothèse d'indépendance entre les solutions qu'ils préconisent et les paramètres physiques et coûts qu'ils utilisent.

- La solution proposée, en réponse à un problème concret, peut invalider le système de coûts utilisé et remettre en cause la pertinence des solutions proposées par le modèle. On évoquera rapidement ce point, généralement négligé, même s'il ne conduit pas à l'introduction de pénalité.
- Il n'en est pas de même pour la remise en cause de l'indépendance entre les solutions et les paramètres du modèle physique, principalement ceux qui traitent

des caractéristiques de la demande adressée au système productif étudié.

Certains coûts de ces modèles génériques traitant de systèmes fictifs, comme les coûts de commande et de possession, utilisés dans les modèles d'approvisionnement, qui sont calculés comme la somme d'un coût variable direct et du quotient de charges annuelles d'un service dédié, par le nombre de prestations similaires que ce service fournit (nombre moyen de commande et niveau de stock moyen, historiquement constatés). L'application généralisée de ce type de modèle peut modifier sensiblement à la baisse ce nombre prestations, invalidant de ce fait le coût de commande à l'origine de cette solution. Cette observation devrait conduire à une démarche itérative pour faire converger la représentation du modèle physique du modèle décisionnel et celle du modèle de coût, ce qui n'est presque jamais fait et diminue l'intérêt de l'appel à ce type de modèle.

L'application à un problème réel, de la solution optimale proposée par un modèle décisionnel portant sur un système fictif stochastique peut remettre en cause les caractéristiques de la demande si elle conduit à une probabilité de rupture suffisamment élevée pour entraîner une modification progressive des caractéristiques de la demande (en particulier, de son niveau). Il s'ensuit une perte de *goodwill* que l'on cherche à limiter en introduisant dans le modèle un coût de rupture qui a pour objet d'empêcher ou de limiter les modifications de la demande. Le lien entre ce coût de rupture et la limitation de la perte de goodwill est impossible à établir objectivement ; on se trouve alors plus dans une logique de pilotage des comportements que dans une approche économiquement fondée.

4.2 Impact de la non-satisfaction de toutes les demandes

La demande exprimée sur la période retenue par le modèle décisionnel peut ne pas pouvoir être satisfaite en totalité. Ce cas de figure est pris en compte dans la modélisation de systèmes *fictifs* conduisant à des solutions analytiques prenant en compte un éclairage économique, principalement dans un contexte *stochastique* défini en régime de croisière. Dans ce type de modèle, l'arbitrage économique conduit à accepter de ne pas satisfaire toutes les demandes. Deux cas de figure, fondés sur le type de client du système étudié, le client final (B2C) ou un autre système productif (B2B), doivent être distingués pour comprendre les conséquences d'une défaillance et donc le type de pénalité à mettre en œuvre.

4.2.1 Système productif de type B2C

Le système étudié vend des produits directement utilisés par le client final. Deux cas de figure doivent être distingués, selon que ce produit est personnalisé ou non.

Dans le premier cas (prestation de transport avec réservation, série limitée…), une pénalité est versée aux clients si le contrat ne peut être honoré. Le *yield management* illustre bien cette situation pour laquelle plusieurs modèles existent pour déterminer le nombre optimal de places à vendre en surréservation. Dans ce cadre, la détermination de la pénalité à verser aux clients acceptant de renoncer à la prestation achetée est une affaire de « perception des comportements » par les spécialistes du *yield* et peut difficilement être fondée rationnellement en raison de la multiplicité des contextes de défaillance, cette détermination pouvant toutefois être défini par une norme réglementaire (c'est le cas de l'UE).

Le système peut vendre à des clients un produit banalisé (par exemple, quotidiens, bouteilles d'eau), dont la demande est définie sur une période séparant deux réapprovisionnements. On commencera par une présentation de ce type de modèle en considérant que le modèle générique étudié ne traite qu'un seul produit, avant d'envisager la généralisation de ce type de modèle à une gestion conjointe de plusieurs produits.

- Le critère économique est logiquement celui de la maximisation de l'espérance mathématique de la marge, qui fait intervenir le produit de l'espérance mathématique de la demande satisfaite par le prix de vente, diminué de l'espérance mathématique du coût des invendus au cours de la période. Si le prix de vente n'est pas sujet à des variations, on utilise alors une approche équivalente de minimisation d'une espérance de coûts dans laquelle intervient le produit de l'espérance mathématique de la rupture de stock, par un coût de rupture. Dans le cas de demandes non satisfaites perdues, ce coût de rupture est généralement la marge unitaire procurée par la vente du produit, ce qui correspond à un coût d'opportunité. On augmente parfois ce coût de rupture d'une pénalité si les données du problème conduisent à une probabilité de rupture trop forte, pouvant remettre en cause les caractéristiques de la demande (comme évoqué à la fin du §3.2). On notera que ce type d'approche tient difficilement compte des reports possibles de la demande sur des produits substituables. Dans le cas d'une demande satisfaite différée, le coût de rupture correspond à une estimation assez arbitraire d'un coût de traitements administratif de la demande différée.

- Le plus souvent, l'hypothèse de gestion indépendante des approvisionnements n'est pas acceptable, le système productif considéré devant gérer simultanément de nombreux produits en tenant compte de diverses contraintes comme celles d'un niveau maximal d'immobilisation financière ou d'utilisation d'un espace de stockage. La fonction-objectif devient alors la somme des fonctions-objectifs des problèmes élémentaires et, dans la résolution analytique du problème, on doit introduire les contraintes d'utilisation conjointe des ressources limitées considérée (Giard 2003, chap.12). On est alors amené à optimiser un lagrangien constitué de :
  - la somme des fonctions-objectifs des problèmes élémentaires et
  - de la somme pondérée des différences entre dotations et consommations des contraintes, par un « multiplicateur de Lagrange ».

Les solutions analytiques trouvées dans un contexte d'indépendance sont alors modifiées et ce multiplicateur de Lagrange s'interprète comme une pénalité puisqu'il mesure le coût marginal du resserrement de la contrainte sur la ressource considérée. Il faut souligner que cette pénalité n'est pas sous contrôle du décideur qui ne peut agir dessus qu'en modifiant les dotations de contraintes.

4.2.2 Système productif de type B2B

Il convient de distinguer le cas de pénalités contractuellement définies entre deux parties, de celui de pénalités définies arbitrairement.

Cas de pénalités contractuellement définies.

Le premier cas ne suscite pas de problèmes méthodologiques particuliers car il s'agit bien d'un coût réel supporté en cas de défaillance du système. A priori, ce cas de figure ne se rencontre pas dans les modèles génériques qui traitent de systèmes fictifs. Les modèles décisionnels portant sur des systèmes réels et utilisant ce type de pénalité sont plutôt en univers certain. On peut illustrer ce cas de figure dans la gestion portuaire : l'armateur, qui équipe le navire et le frète, est tenu de mettre un navire à la disposition de l'affréteur qui loue le navire pour acheminer ses marchandises, pour l'utiliser à quai pendant une période contractuellement définie ; en cas de dépassement de cette période, l'affréteur doit payer une pénalité financière (*demurrage*) à l'armateur ; souvent, l'affréteur gère un ou plusieurs quais et travaille avec plusieurs armateurs, ce qui le conduit à devoir intégrer l'existence de ces pénalités, proportionnelles au temps de dépassement, dans les modèles d'utilisation optimale des quais (Bouzekri *et al*., 2019a) (Bouzekri *et al.,* 2019b).

Cas de pénalités arbitrairement définies.

Dans une logique de chaîne logistique (CL), la production du système étudié (maillon-amont, fournisseur) peut être acquise par un autre système de production (maillon-aval, client) pour permettre sa propre production (par exemple, approvisionnement de composants par une usine). Rentrent dans la même catégorie les modèles de maintenance qui visent à gérer la disponibilité d'un équipement fournissant des prestations opérationnelles à un atelier. On s'intéresse ici à des modèles décisionnels portant sur des systèmes fictifs ou réels fonctionnant en univers aléatoire, la modélisation en univers certain ne présentant que peu d'intérêt.

Dans ce contexte, la non-satisfaction de la demande a des conséquences bien différentes de celles analysées au §3.2.1, car elle induit un arrêt de production sur un poste de production du système client. La propagation dans temps et dans l'espace de cette rupture d'approvisionnement conduit progressivement à des arrêts de production en amont et en aval du poste concerné, respectivement par saturation de stock et désamorçage (composants manquants). Cette propagation est particulièrement rapide si la production du client est organisée en ligne. Dans ce contexte, les conséquences économiques ne sont pas directement liées à un nombre ou une durée de rupture de stock.

Certains modèles d'approvisionnement proposent une solution analytique s'appuyant sur une distribution de probabilité de la durée de rupture et l'usage d'une pénalité horaire ou sur une pénalité indépendante de la durée de rupture, supportée en cas de rupture d'approvisionnement (Naddor, 1966) ; de tels paramètres semblent difficiles à déterminer objectivement.

Ce problème peut être pris de manière radicalement différente, s'il est possible d'anticiper l'occurrence de la rupture de stock d'une journée ou deux, ce que l'interconnexion des systèmes d'information permet assez facilement. On peut alors envisager de mettre en place une procédure d'approvisionnement d'urgence certes coûteuse mais empêchant la rupture de stock de se produire (Sali & Giard 2015). Selon la solution d'urgence retenue, la pénalité peut être proportionnelle au nombre d'unités manquantes (solution de type DHL) ou varier par palier (par exemple, affrètement d'un ou plusieurs avions ou camions).

5 PENALITES ASSOCIEES A LA VALORISATION D'UN CRITERE D'EFFICACITE

Ce cas de figure peut se poser dans les modèles décisionnels établis en univers certain et portant sur des systèmes réels correspondant à des maillons productifs d'une CL continue ou hybride. Dans ce contexte, le maillon-amont MP1, pour lequel on établit un modèle décisionnel a pour client un maillon-aval MP2 de la CL qui définit sa demande en quantité et qualité. Pour mieux faire comprendre la problématique des pénalités dans ce cas de figure, nous nous appuyons sur un exemple réel.

Contrairement aux processus discrets dans lesquels on arrive à maîtriser la qualité des composants et modules utilisés et produits, la production continue est tributaire des caractéristiques de la matière première, lesquelles ne sont pas stables. Par exemple le lot de minerais de phosphate utilisé par MP2 pour fabriquer un lot d'acide phosphorique est fourni par MP1 qui fabrique ce lot par mélange de minerais extraits par le maillon de l'extraction de la CL, dont il est client. Ces minerais extraits sont de compositions différentes et leur production dépend de contraintes géologiques. Le mélange demandé par MP2 doit respecter une charte-qualité définie par des plages de valeurs pour quelques composants chimiques et MP1 cherche la solution la plus économique pour lui, tenant compte des disponibilités de minerais extraits. Ces contraintes de composition sont relativement faciles à prendre en compte mais le problème additionnel est que deux lots de minerais livrés successivement à MP2, tout en respectant la charte qualité, n'ont pas la même composition. Au changement de lots de minerais dans la ligne de la fabrication d'acide phosphorique, ces différences peuvent nécessiter, des ajustements coûteux du processus de production d'acide, difficiles à quantifier. Dans ces conditions, il

est souhaitable de stabiliser la composition des lots expédiés à MP2, en cherchant à minimiser un indicateur de déviance de la composition des lots produits par MP1, autour de valeurs-cibles pour leurs compositions. Il s'agit là d'un indicateur d'efficacité pour MP2 que MP1 peut intégrer dans la recherche de sa solution de blending. Deux approches sont alors possibles.

- Le *goal programming* a été imaginé dans les années soixante-dix pour traiter ce problème de recherche d'une double optimisation, en proposant de privilégier l'un des objectifs (celui du coût, par exemple) et d'introduire le second sous la forme d'une contrainte minimale de niveau. Cette approche a pour inconvénient de ne pas toujours permettre de trouver une solution si la contrainte minimale de niveau est forte. Par ailleurs, l'introduction de telles contraintes rigidifient les relations client-fournisseur entre certaines entités de la CL, sans permettre une amélioration de l'efficience globale de la CL.
- Dans ce contexte, on peut utiliser une fonction-objectif constituée de la somme de la fonction-objectif de coût (qui correspond à une réalité économique) et du produit de l'indicateur de déviance par une pénalité. Ce faisant, on est assuré de trouver une solution, s'il en existe une, en l'absence de prise en compte de la déviance. En faisant varier progressivement cette pénalité, la déviance diminue pour atteindre une limite déterminée par les disponibilités de minerais extraits. On peut alors établir un graphe représentant le couple « déviance- coût de production », ce qui permet d'établir l'accroissement de coût pour MP1 imputable à une réduction de déviance pour MP2. Ces informations constituent une base possible de négociation de contraintes entre MP1 et MP2, et permettre d'améliorer la performance consolidée de MP1 et MP2. Dans cette perspective, la signification de la pénalité et de son niveau n'a pas grande importance. Une telle approche, testée sur la CL de l'OCP (Azzamouri et al., 2020) (Bamoumen et al., 2020), est facilement transposable dans d'autres contextes de CL.

6 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons cherché à montrer l'intérêt mais aussi les limites de l'usage des pénalités dans les modèles décisionnels. Le cadre conceptuel proposé est améliorable mais il permet de donner quelques pistes sur les précautions méthodologiques à respecter lors de la création de modèles utilisant des pénalités mais aussi dans l'utilisation de tels modèles.

REFERENCES

Azzamour A., M. Bamoumen, H. Hilali, V. Hovelaque, V. Giard, 2020. Flexibility of dynamic blending with alternative routings combined with security stocks: a new approach in a mining supply chain , *International Journal of Production Research*, DOI: 10.1080/00207543.2020.1814443

Bamoumen M., V. Hovelaque, V. Giard. Un modèle de blending pour la planification dynamique d'une chaîne logistique minière, MOSIM 2020.

Bara N., F. Gautier, and V. Giard, 2019. An economic evaluation of operational decisions – an application in scheduling evaluation in fertilizer, *Production Planning & Control.* DOI:10.1080/09537287.2020.1751891

Bouzekri H., G. Alpan, and V. Giard, 2019. Modélisation des problèmes de l'allocation des planches et des postes à quais, *CIGI QUALITA 2019*, Juin 2019, Montréal, Canada. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02277658v1

Bouzekri H., G. Alpan, and V. Giard, 2019. Integrated Laycan and Berth Allocation Problem. *IESM 2019,* septembre 2019, Shanghai. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02342441v1

Giard V. 2003. *Gestion de la production et des flux* (3e édition), Economica. ISBN 978-2-7178-4498-6.

Giard, V. 2017. Methodological Problems in Defining Costs Used in Industrial Management Decision Models 7th IESM Conference, Saarbrücken, Germany, Octobre 2017. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01708054

Naddor E., *Inventory Systems*, John Wiley & Sons, 1966. ISBN: 978-0471628309

Sali M. and V. Giard, 2015. Optimal stock-out risk when demand is driven by several mixed-model assembly lines in the presence of emergency supply, *International Journal of Production Research*, vol. 53, n°11, p. 3448-3461. DOI:10.1080/00207543.2014.997398

OPTIMAL INTEGRATION OF PRODUCT CONFIGURATION AND PROCESS PLANNING TO MEET INDIVIDUAL CUSTOMER REQUIREMENTS IN MASS CUSTOMIZATION

Rachel CAMPOS SABIONI, Joanna DAABOUL and Julien LE DUIGOU

Université de technologie de Compiègne, CNRS, Roberval (Mechanics energy and electricity), Centre de recherche Royallieu - CS 60 319 - 60 203 Compiègne Cedex
rachel.campos-sabioni@utc.fr, joanna.daaboul@utc.fr, julien.le-duigou@utc.fr

ABSTRACT: *According to researchers and practitioners, modular products are considered as key enablers for Mass Customization (MC). Modular design is a strategy for designing products composed by many subparts (modules), which are developed separately and assembled later in different ways, enabling the configuration of several product variants. Customers do not always know how to translate their requirements into product configurations, thus an alternative could be 'co-configuring' the product with them. This is done by an automatic modules selection based on customer requirements to get a first product configuration, which can be subsequently adjusted by the customer, if necessary. Currently, the optimal module selection is mainly conducted without considering the process planning optimization. Nevertheless, integrating both optimizations would increase product/process flexibility and agility, reducing the overall manufacturing costs. Thereby, it is important to integrate the product configuration, driven by individual customer requirements, with the process planning for MC. This paper proposes a 0-1 integer linear programming model to optimize, in terms of cost-minimization, the integration of product configuration and process planning, for MC. Results obtained with a 2-steps approach composed by an exhaustive search algorithm (ESA) and CPLEX-solver show that total cost can be considerably minimized if both optimizations are considered together.*

KEYWORDS: *Systems optimization, Operations Research, Industry 4.0, Production systems of goods and services, Mass Customization, Co-design.*

1 INTRODUCTION

The recent technological advances provided by the Industry 4.0 together with the globalization are increasingly affecting the customer behaviors and requirements (Koren 2010; Wang et al. 2017). Currently, customers no longer want just standard products; they prefer customized and high quality products capable to satisfy their individual requirements. This new era of large variety demand and market instability, has forced companies to find innovative and viable ways of attending customer demands in relatively few time and low cost (Wang et al. 2017).

One strategy that companies have been using in order to increase their product offers to attain individual customer requirements by keeping the competitiveness is the Modular Product Design (MPD) strategy. MPD means the development of products capable to accomplish several functionalities through the combination of different modules (Pahl and Beitz 1995; Gershenson et al. 2003). According to some authors, the MPD seems to be the best product design strategy to achieve a sustainable Mass Customization (MC) (Pine 1993; Sanchez and Mahoney 1996).

Currently, the most common strategy used by companies on the configuration of modular mass-customized products is asking customers to configure their product themselves, through a configurator, in which they can choose their desired modules (Pitiot et al. 2014). Generally, customers are not assisted during the purchase process, since only options of modules are proposed (Chen and Wang 2010; Piller and Walcher 2017).

Nevertheless, customers do not always know how to translate their requirements into product configurations. Non-experts or customers new to a given product type do not have sufficient knowledge about the product and struggle to find what they want (Huffman and Kahn 1998). In MC contexts, this kind of trouble can be even worse due to the high set of choices.

Further, current configurators do not integrate production planning or supply chain issues, such as cost and time. Companies usually present a product price and delivery date calculated by standard values of duration as well as material and operation costs (Pitiot et al. 2014). Nevertheless, costs related to manufacturing are variable and can significantly affect the product price.

The several possibilities of sequencing and assigning operations, required to manufacture a product, into machines, together with the various ways of combining modules in a product configuration driven by individual customer requirements can greatly increase the system

complexity, regarding to product differentiation (Tseng et al. 1996; Koren et al. 2018). The process planning, product configuration and customer requirements are interconnected and they must be integrated in a sense that process plan decisions are also based on product configuration (i.e. the set of modules compounding the product), which in turn is oriented by individual customer requirements.

In order to achieve this integration, this paper proposes a 0-1 integer linear programming (ILP) model that integrates individual customer requirements, product configuration and process planning in order to minimize the overall manufacturing costs. For validating this model, a 2-steps approach based an exhaustive search algorithm (ESA) and CPLEX solver was applied to solve a numerical example.

This paper is organized as follows. Section 2 presents a literature review. The problem statement is in Section 3, while Section 4 brings the proposition and the numerical illustration. Finally, Section 5 presents the conclusion and research perspectives.

2 LITERATURE REVIEW

2.1 Product Configuration and Configurators for MC

MPD consists of developing modular products composed by a set of relatively autonomous modules that can be combined in several ways to accomplish various functionalities (Pahl and Beitz 1995). In many cases, modules can have variants called module instances. The combination of different module instances to create product variants takes place in the product configuration, an essential stage in MPD (Jiao and Tseng 2000; Paes et al. 2018).

The objective of MC is providing products that meet individual customer needs with mass production efficiency (Jiao and Tseng 1999). In order to enable the participation of customers into the value creation, the configuration of mass-customized products is carried out through configurators (Chen and Wang 2010; Piller and Blazek 2014). Configurator is a "co-design toolkit" that allows customers choosing and combining different product components (modules), during a purchase process, until they find a product variant that fits their needs (Piller and Blazek 2014).

Most of configurators only give choices of product components, without assisting the customer during their purchase process (Chen and Wang 2010; Piller and Walcher 2017). Nevertheless, customers do not always know how to translate their needs into product configurations. Further, as stated by Liu et al. (Liu et al. 2017), the main objective of customers when buying a product is benefiting from its functionalities rather than getting the product embodiment. Likewise, Huffman and Kahn (1998) state that presenting the product information based on its attributes/functionalities, instead of showing product alternatives, reduces the purchasing process complexity while increases the customer satisfaction. This means that guiding customer choices through product functionalities (PFs) seems to be more appropriate than just proposing them many product alternatives.

Further, the high number of choices proposed by MC can entail customers to the "paradox of choice", with risk of turning MC into "mass-confusion" (Piller and Walcher 2017). The large set of options proposed in an MC configurator together with the knowledge gap between customers and companies, makes the product configuration for MC being a main driver for customization complexity, from the customers' viewpoint (Franke et al. 2004; Chen and Wang 2010).

To overcome this problem, some works have tried to optimize product configuration driven by individual customer requirements in order to increase customer satisfaction (Hong et al. 2008; Dou and Zong 2014; Zhao et al. 2020). Although these researches focused on customer needs when configuring products, they did not consider costs related to manufacturing process. However, as previously stated, a sustainable MC must provide products capable of meeting individual customer requirements while being efficiently mass-produced. Thus, it seems to be of great importance to consider manufacturing costs when configuring a product for MC, and these costs depend among others on the process planning.

2.2 Integrated product configuration and process planning driven by customer needs

Process planning is related to transcribing the product design data into a method to manufacture it, including selection of machines and operations sequencing (Mohapatra et al. 2013). This means, manufacturing costs, such as operations and material handling costs, will vary according to the process plan. In addition to the overall manufacturing costs, process planning can significantly affect the product performance, since an inappropriate process plan cannot ensure the achievement of desired PFs (Xu and Liang 2006).

On the other hand, product configuration without regard to the manufacturing system settings can imply in higher production cost and delivery time (Jiao and Tseng 2000; Xu and Liang 2005). When configuring products for MC, in addition to the manufacturing system it is important to consider specific customer requirements in order to meet their individual needs. Although product configuration and process planning are essential elements for MC, few papers addressed both subjects together by considering individual customer needs (Pine 1993; Pitiot et al. 2013).

Among them, Pitiot et al. (Pitiot et al. 2013, 2014, 2020) addressed manufacturing costs considering variable resources, but they did not precise if the same operation could be performed by different resources neither did they address material handling costs. Further, to our

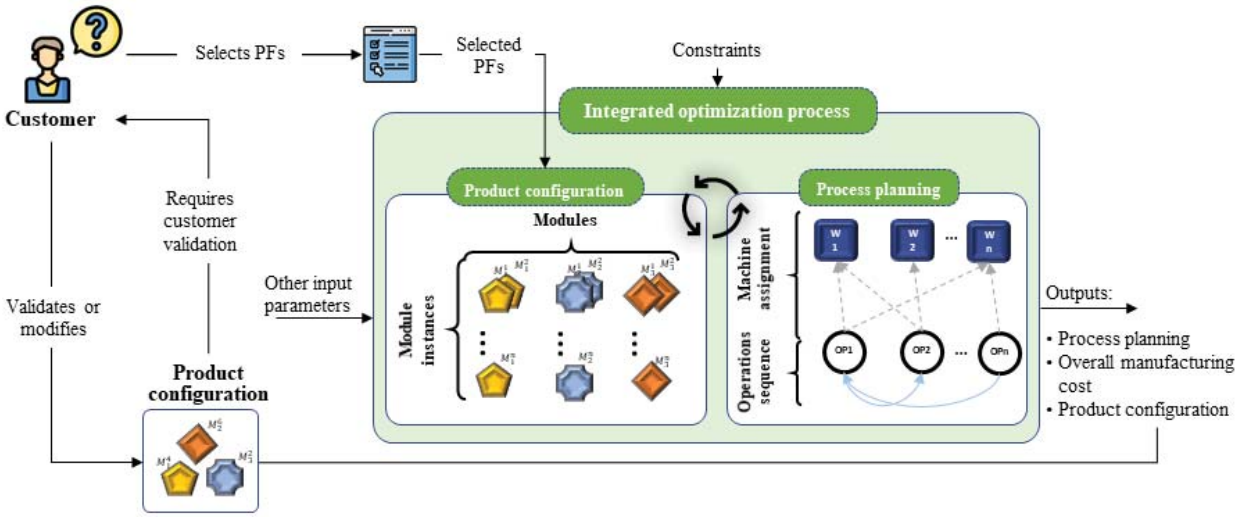


Figure 1. Proposition's illustration of the integrated modular product configuration and process planning for manufacturing mass-customized products.

best comprehension, they did not address the possibility of having different instances within the same module.

Zhou et al. (2008), Li et al. (2006) and Yang et al. (2020) tried to optimize the product configuration for mass-customizing products. They considered costs of product modules and/or module instances in their optimization problems, but they did not detail these costs in terms of manufacturing costs (material handling, operations cost, etc.) and raw material cost. Meaning each module always had the same cost, no matter the process plan.

Yigit et al. (2002) and Yigit and Allahverdi (2003), in turn, were not focused on MC, but they included individual customer requirements as input/constraints to optimize the product configuration concurrently to the process planning in a reconfigurable manufacturing system. They assumed that each type of module could have two or three module instances. However, they considered that for each type of module, there was a fixed production system configuration; consequently, manufacturing costs were considered constant according to the type of fabricated module.

The increasing globalization and demand for customized and personalized products has forced companies to be more flexible and reactive (Najid et al. 2020). This is why companies have invested in flexible manufacturing systems (FMS) and, more recently, in reconfigurable manufacturing systems (RMS) (Najid et al. 2020). In these manufacturing systems different types of machines can execute the same operation, increasing their flexibility and capacity to produce high product variety.

Nevertheless, as far as we know, there is still no work proposing to optimize the configuration of mass-customized products, driven by individual customer requirements, integrated with the process planning in FMS or RMS, with machines performing many operations, and the same operation being performed by different machines.

Further, no papers addressing the concurrent optimization of product configuration and process planning considered material handling costs in their objective functions. However, this cost can significantly affect the overall manufacturing cost.

3 PROBLEM STATEMENT

Rather than proposing modules to the customers, here they are invited to select, among a set of options, which PFs they desire in their product. Each individual customer requirement can be translated into a PF that are represented by product modules. Each instance from a module can satisfy several PFs, while each PF can be satisfied by one or many module instances.

The set of operations required to manufacture a product variant corresponds to the combination of the operations required by each module instance chosen in the product configuration. Operations can be performed by different machines, whilst the same machine can perform several operations. In any case, each operation is performed once while the same machine can be assigned many times, but never to multiple operations simultaneously. The operation's cost can change from one machine to another and there is a cost of handling material between two machines. Therefore, manufacturing costs cannot be considered constants according to the module instance type.

Several product configurations can origin from the combination of module instances capable of satisfying PFs required by the customer, Each module instance has a raw material cost, in addition to that, costs of manufacturing, assembly and material handling are also considered. Thus, the number and types of selected module instances as well as how operations are sequenced and

assigned can affect the search for the optimal product configuration. It means a product configuration with the lowest overall manufacturing cost capable to meet all individual customer requirements (required PFs).

4 PROPOSITION

Figure 1 illustrates the proposition for integrating the product configuration with the process planning with consideration of individual customer requirements for MC.

Customers specify which PFs they want in their product. Only module instances capable to satisfy at least one PF are considered in the product configuration stage. Each product configuration will require a set of operations that must be sequenced and assigned to machines, at process level. The optimal product configuration corresponds to the one that meets all customer requirements (required PFs) and that has the lowest overall manufacturing cost, which comprises (1) costs of raw material, (2) operations and (3) material handling. Finally, the customer validates the product variant proposed and, if she/he wants, she/he can do some changes.

4.1 Mathematical model

4.1.1 Assumptions

i. Instances from different modules cannot require the same operations;
ii. Each machine is able to perform different operations;
iii. The same operation can be performed by different machines.

4.1.2 Input parameters

F	= {1,2, … , f, … , |F|}, Set of all available product functionalities
D_f	=1, if functionality f is required; = 0,otherwise
M	= {1,2, … , m, … , |M|}, Set of modules
I	= {1,2, … , i, … , |I|}, Set of module instances
$G_{m,i,m',i'}$	=1, if instance i of module m is compatible with instance i' of module m'; 0 ,otherwise
S_{mif}	=1, if instance i of module m satisfy a functionality f; = 0, otherwise
OP	= {1,2, … , p, … , |OP|}, Set of available operations
R_{pmi}	=1, if instance i of module m requires an operation p; = 0,otherwise
$P_{pp'}$	=1, if an operation p must be processed before operation p', for p,p' ∈ OP, p≠p' =0,otherwise
W	= {1,2, … , w, … , |W|}, Set of all available machines
Q_{pw}	1, if an operation p is feasible on machine w; 0, otherwise
J	= {1,2, … , j, … , n}, Set of process plan positions
α_{mi}	Raw material cost of each instance i of module m
σ_{pw}	Cost per time unit of processing operation p on machine w
ψ	Cost of transporting material between two machines per distance unit
$d_{w,w'}$	Distance between machines w and w' according to their layout positions
τ_{pw}	Processing time of operation p at machine w

4.1.3 Decision variables

y_{mi}	1, if instance i of module m is selected. 0, otherwise.
x_{pwj}	1, if operation p is assigned to machine w in process plan position j. 0, otherwise.
$t_{w,w'j,j+1}$	1, if the occurrence of machine w is on the position j of process plan and the occurrence of machine w' is on the position j+1. 0, otherwise.

4.1.4 Objective function

Eq. (1) presents the objective function, which consists of the sum of raw material cost (CRM), operations cost (CP) and material handling costs (CMT):

$$Z = CRM + CP + CMT \qquad \min Z \tag{1}$$

Where:

$$CRM = \sum_{m}\sum_{i} y_{mi} \times \alpha_{mi} \tag{2}$$

$$CP = \sum_{p}\sum_{w}\sum_{j} x_{pwj} \times \sigma_{pw} \times \tau_{pw} \tag{3}$$

$$CMT = \sum_{w,w' \in W}\sum_{j} t_{ww'j,j+1} \times \psi \times d_{w,w'} \tag{4}$$

Subject to:

$$\sum_{i} y_{mi} \leq 1 \qquad \forall m \in M \tag{5}$$

$$y_{mi} + y_{m'i'} \leq G_{m,i,m',i'} + 1 \qquad \forall m, m' \in M \tag{6}$$

$$\forall\, i, i' \in I$$

$$\sum_{m}\sum_{i} y_{mi} \times S_{mif} \geq D_f \qquad \forall\, f \in F \qquad (7)$$

$$\sum_{p}\sum_{w} x_{pwj} = 1 \qquad \forall\, j \in J \qquad (8)$$

$$\sum_{w}\sum_{j} x_{pwj} = 1 \qquad \forall\, p \in OP \qquad (9)$$

$$\sum_{p}\sum_{m}\sum_{i} y_{mi} \times R_{pmi} = \sum_{p}\sum_{w}\sum_{j} x_{pwj} \times Q_{pwc} \qquad (10)$$

$$\sum_{w'}\sum_{j'=1}^{j-1} x_{p'w'j'} \geq \sum_{w} x_{p,w,j} \times P_{p'p} \qquad (11)$$

$$\forall\, p, p' \in OP \qquad \forall\, j = 1, 2, \ldots, n$$

$$\sum_{w,w' \in W} t_{w,w'j,j+1} \leq 1 \qquad \forall\, j \in J \qquad (12)$$

$$t_{w,w'j,j+1} \geq x_{pwj} + x_{p'w'j+1} - 1 \qquad (13)$$

$$y_{mi} \in \{0,1\} \qquad \forall\, m \in M,\ \forall\, i \in I \qquad (14)$$

$$x_{pwj} \in \{0,1\} \qquad \forall\, p \in OP,\ \forall\, w \in W,\ \forall\, j \in J \qquad (15)$$

$$t_{w,w'j,j+1} \in \{0,1\} \qquad \forall\, w \in W,\ \forall\, j \in J \qquad (16)$$

Constraint Eq. (5) ensures that only one instance (i) of a given module (m) can be selected each time. Eq. (6) states that only the module instance i compatible with the module instance i' can be selected to constitute a given product variant. Eq. (7) ensures that each required product functionality (f) must be satisfied by at least one selected module instance (Y_{mi}). Eq. (8) states that each operation (p) is processed at one process plan position (j) by one machine (w), whilst Eq. (9) states that each operation (p) is processed once in one machine (w). With constraints (8) and (9), the Eq. (10) ensures that each of all required operations must be performed in only one machine (w) at one stage of the process plan (j). Eq. (11) describes the precedence constraint. Constraint (12) ensures that between position j and j+1 there is at most one machine change($t_{w,w'j,j+1}$), while the Eq.**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** states that if two followed machines in the process plan are different, there is a material transfer between them ($t_{w,w'j,j+1} = 1$). The variable domains are described by Eq. (14), (15) and (16).

4.2 Solution approach

In this paper, a 2-step solution approach (Figure 2) based on an exhaustive search algorithm (ESA) and CPLEX solver is proposed. As previously said, in this paper each PF can be satisfied by at least one module instance.

Further, each combination of module instances corresponds to a product configuration (PC). In the first step, ESA lists all possible PCs, through the combination of all available module instances, while respecting the compatibility constraint of module instances. Then, based on the customer requirements, it means, their desired PFs, ESA filters all available PCs, to obtain only feasible product configurations (FPC). Each FPC corresponds to a PC capable to satisfy all PFs required by the customer.

Operations required by each feasible PC are inputs to the second step, in which the optimal operations sequence and machine assignment for each FPC is searched with the aid of CPLEX solver. The total cost as well as optimal process planning found for each FPC is archived. At the end, the set of optimal solutions found for all FPCs is enumerated and therefore the global optimal is selected, which corresponds to the FPC presenting the process plan and product configuration with the minimal overall manufacturing cost. Here, the minimal overall manufacturing cost includes costs of (1) raw material, (2) operations and (3) material handling.

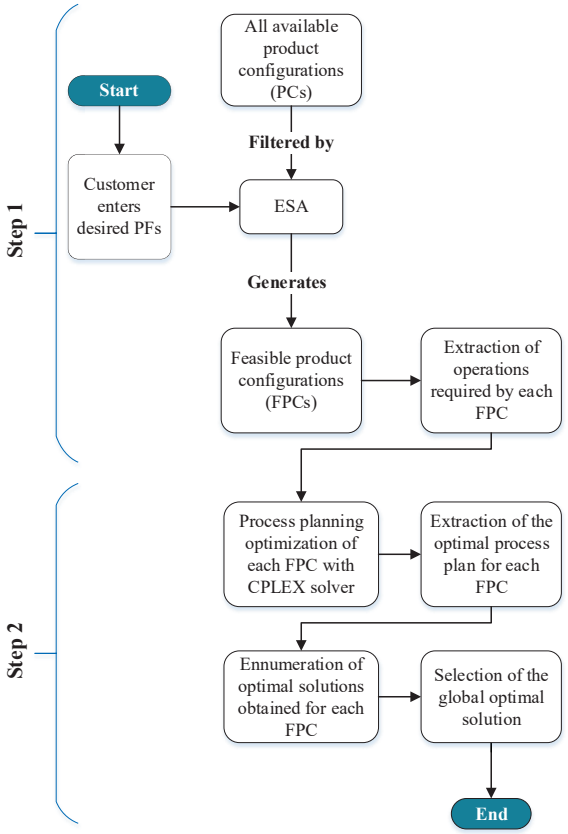


Figure 2. Framework of the 2-step solution approach to optimize the product configuration integrated with its process planning by considering individual customer requirements.

This approach allows for the simultaneous optimization of PC and process planning, while ensuring that:

1) The minimum cost is obtained;
2) All customer requirements, it means, PFs required by the customer, are attended.

4.3 Results and discussion

In order to verify the model and the solution approach, a numerical illustration with 7 available PFs, 4 modules (with module instances varying from 2 to 5 per module), 13 operations, 10 machines, positioned in different layout positions with known distances, was used.

The algorithm was implemented in Python 3.7 language and all tests were conducted in a laptop computer powered by an Intel core i7-7600U CPU (2.80 GHz) and 16 GB of RAM.

In this problem, the optimal solution will always depend on the PFs required by the customer. Since in the example 7 PFs are available, there are 127 different ways of requiring these PFs (e.g. PF1+PF2, PF2+PF4+PF5, etc.), consequently there is a global optimum for each case. However, no matter which PFs customer requires, the proposed solution approach follows the same steps. Due to that, only one example is presented in this paper for detailing the obtained results.

The optimal solution found for the example considering the selection of PFs 1, 4, 5, and 7 is presented in Table 1. The best product configuration is composed by the module instances M1I3, M3I1 and M4I1 (M1I3 is instance 3 of module 1), with an overall manufacturing cost of 43.52 €. The CPU time required was 60.96 s.

Table 1. Results found for the example considering the following selected PFs: 1, 4, 5, and 7.

Step 1 – Filtering all FPCs							
Selected PFs	1, 4, 5, 7		**Number of FPCs**	5			
Step 2 – Finding the global optimum							
The best FPC is composed by :			Overall production cost is:				
M1I3, M3I1 and M4I1			43.52 €				
The best process planning is:							
Process position:	j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7
Machine	W1	W10	W6	W6	W6	W4	W7
Operation:	OP 1	OP 11	OP 8	OP 2	OP 12	OP 7	OP 10

5 CONCLUSION

This paper proposed an approach to reduce "mass confusion" through customer guidance at the product configuration stage, while integrating the latter with the process planning in order to minimize overall manufacturing cost. This cost is composed of (1) raw material of module instances, (2) process operations and (3) material handling. This optimization was modeled as an ILP problem and a 2-steps approach was used to solve it.

In this model, the product configuration was optimized in terms of PFs required by customers, proving that it is possible to integrate customer requirements while optimizing the product configuration integrated to the process planning. Results found have proven that considering manufacturing costs when configuring a product for MC is relevant, because a product with a more expensive raw material cost does not always mean a higher overall manufacturing cost. Therefore, this approach can be used as an alternative to help customer during their decision making process in order to reduce the "mass confusion" caused by the too many available choices in MC contexts.

Further, the exact solution approach presented in this paper has proven its ability to find rapidly and efficiently a global optimum, for a relatively complex problem that integrate two combinatorial problems: the product configuration and process planning.

For future researches, we want to evaluate the integration of product configuration and process planning in a RMS, by exploring its ability to reconfigure at machine and layout levels simultaneously. Further, we want to test this solution approach with a real product, and therefore with higher instances.

ACKNOWLEDGMENTS

This research has been funded by the French National Agency of Research (Agence Nationale de la Recherche – ANR) as part of the project Integrated Product and Process Modular Design (IPROD).

REFERENCES

Chen Z, Wang L (2010) Personalized product configuration rules with dual formulations: A method to proactively leverage mass confusion. Expert Systems with Applications

Dou R, Zong C (2014) Application of Interactive Genetic Algorithm based on hesitancy degree in product configuration for customer requirement. International Journal of Computational Intelligence Systems 7:74–84

Franke N, Piller F, Piller FT (2004) Toolkits for User Innovation and Design: an Exploration of User Interaction and Value Creation in the Watch Market. Journal of Product Innovation Management 21:401–415

Gershenson JK, Prasad GJ, Zhang Y (2003) Product modularity: Definitions and benefits. Journal of Engineering Design 14:295–313

Hong G, Hu L, Xue D, et al (2008) Identification of the optimal product configuration and parameters based on individual customer requirements on

performance and costs in one-of-a-kind production. International Journal of Production Research 46:3297–3326

Huffman C, Kahn BE (1998) Variety for sale: Mass customization or mass confusion? Journal of Retailing 74:491–513

Jiao J, Tseng MM (1999) Methodology of developing product family architecture for mass customization. Journal of Intelligent Manufacturing 10:3–20

Jiao J, Tseng MM (2000) Fundamentals of product family architecture. Integrated Manufacturing Systems 11:469–483

Koren Y (2010) The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems. John Wiley & Sons, Inc.

Koren Y, Gu X, Guo W (2018) Choosing the system configuration for high-volume manufacturing. International Journal of Production Research 56:476–490

Li B, Chen L, Huang Z, Zhong Y (2006) Product configuration optimization using a multiobjective genetic algorithm. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 30:20–29

Liu A, Lu S, Zhang Z, et al (2017) Function recommender system for product planning and design. CIRP Annals - Manufacturing Technology 66:181–184

Mohapatra P, Benyoucef L, Tiwari MK (2013) Integration of process planning and scheduling through adaptive setup planning : a multi-objective approach. International Journal of Production Research 51:7190–7280

Najid N-M, Castagna P, Kouiss K (2020) System Engineering-Based Methodology to Design Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Benyoucef L (ed) Reconfigurable Manufacturing Systems : From Design to Implementation. Springer Nature Switzerland AG, p 258

Paes IF, Sabioni RC, Daaboul J, Duigou J Le (2018) Product and Process Modular Design : a Review. In: 8th International Conference on Mass Customization and Personalization – Community of Europe, MCP-CE 2018. University of Novi Sad – Faculty of Technical Sciences Department of Industrial Engineering and Management 21000, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, Serbia, pp 97–106

Pahl G, Beitz W (1995) Engineering Design: a systematic approach. Springer Science & Business Media

Piller F, Walcher D (2017) Leading Mass Customization and Personalization: How to profit from service and product customization in e-commerce and beyond

Piller FT, Blazek P (2014) Core Capabilities of Sustainable Mass Customization. In: Knowledge-Based Configuration: From Research to Business Cases. Morgan Kaufmann Publishers, Waltham, MA, pp 107–120

Pine BJ (1993) Mass customization: The new frontier in business competition. Harvard Business School Press

Pitiot P, Aldanondo M, Vareilles E (2014) Concurrent product configuration and process planning: Some optimization experimental results. Computers in Industry 65:610–621

Pitiot P, Aldanondo M, Vareilles E, et al (2013) Concurrent product configuration and process planning, towards an approach combining interactivity and optimality. International Journal of Production Research 51:524–541

Pitiot P, Monge LG, Aldanondo M, et al (2020) Optimisation of the concurrent product and process configuration: an approach to reduce computation time with an experimental evaluation. International Journal of Production Research 58:631–647

Sanchez R, Mahoney JT (1996) Modularity, Flexibility, and Knowledge Management in Product and Organization Design. Strategic Management Journal 17:63–76

Tseng MM, Jiao J, Merchant ME (1996) Design for Mass Customization. CIRP Annals 45:153–156

Wang Y, Ma HS, Yang JH, Wang KS (2017) Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. Advances in Manufacturing 5:311–320

Xu Z, Liang M (2006) Integrated planning for product module selection and assembly line design/reconfiguration. International Journal of Production Research 44:39–65

Xu Z, Liang M (2005) Concurrent Optimization of Product Module Selection and Assembly Line Configuration: A Multi-Objective Approach. Journal of Manufacturing Science and Engineering 127:875–884

Yang D, Li J, Wang B, Jia YJ (2020) Module-Based product configuration decisions considering both economical and carbon emission-related environmental factors. Sustainability (Switzerland) 12:

Yigit AS, Allahverdi A (2003) Optimal selection of module instances for modular products in reconfigurable manufacturing systems. International Journal of Production Research 41:4063–4074

Yigit AS, Ulsoy AG, Allahverdi A (2002) Optimizing modular product design for reconfigurable manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing 13:309–316

Zhao S, Zhang Q, Peng Z, Fan Y (2020) Integrating customer requirements into customized product configuration design based on Kano's model. Journal of Intelligent Manufacturing 31:597–613

Zhou C, Lin Z, Liu C (2008) Customer-driven product configuration optimization for assemble-to-order manufacturing enterprises. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 38:185–194

DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE SUIVI DES MOUVEMENTS DES GRAINS DE BLE BIOLOGIQUE AU NIVEAU DE LA CHAINE D'APPROVISIONNEMENT

LOIC PARRENIN[1,2], CHRISTOPHE DANJOU [1,2], BRUNO AGARD[1,2]

[1] Laboratoire en Intelligence des Données
[2] Département de mathématiques et génie industriel,
École Polytechnique de Montréal, CP 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada
loic.parrenin@polymtl.ca, christophe.danjou@polymtl.ca, bruno.agard@polymtl.ca

RESUME : *Dans la production de farines biologique, les grains de blé suivent un processus logistique avec de nombreux contrôles en termes de qualité et de quantité. Différentes variétés de blé, chacune avec ses propres qualités, impactent directement la qualité de la farine produite. Le manque d'information sur la qualité des grains de blé entreposés ou mélangés dans des silos le long de la chaine d'approvisionnement complexifie le suivi à destination de l'usine de transformation. Nous proposons de nouveaux outils pour le suivi des grains de blé. Ce suivi fournit une meilleure connaissance des qualités et des quantités de grains de blé en inventaire, d'où une meilleure réactivité sur la chaine logistique. Face à l'augmentation des flux logistiques et aux imprévus météorologiques ou économiques, il est nécessaire d'avoir un processus d'approvisionnement en grain flexible et réactif pour assurer l'ensemble des commandes de chaque client.*

MOTS-CLES : *Grain de blé biologique, chaine d'approvisionnement, transformation numérique, industrie 4.0.*

1 INTRODUCTION

Dans le contexte socioéconomique actuel, plusieurs raisons poussent les consommateurs à valoriser des produits biologiques, que ce soit pour des choix de santé, un choix environnemental, ou simplement pour soutenir l'économie locale [13]. Les habitudes des consommateurs ainsi que leurs besoins évoluent. Avec la croissance démographique et des habitudes de consommation différentes, la demande de produits alimentaires biologiques augmente [1], en particulier pour le blé biologique.

Dans le secteur industriel de transformation des grains de blé, de nombreux contrôles sont réalisés le long de la chaine de valeur afin de garantir les quantités, la traçabilité et la qualité de la farine. Les données collectées ne sont pas forcément exploitées à leur plein potentiel et peuvent être sauvegardées par différents intervenants à plusieurs endroits le long de la chaine de valeur. À partir des données collectées, l'objectif global est d'optimiser les paramètres de production d'une usine de transformation de grain biologique pour améliorer les rendements et maitriser la variabilité de la qualité du produit fini.

La collecte des données sur la chaine d'approvisionnement et de production (qualité et quantité des grains de blé, paramètres de contrôle et d'état des machines de production) est la première étape pour atteindre l'objectif global. La deuxième étape consistera à structurer et traiter l'ensemble des données (collectées à l'étape 1) afin de construire un modèle de prédiction sur la qualité des produits finis en fonction des paramètres machines et de qualités des grains de blé utilisés. Finalement un modèle d'optimisation des réglages des machines de production sera élaboré à l'aide d'algorithmes d'apprentissage machine dans le but d'améliorer les rendements des moulins à farine.

La chaine d'approvisionnement a une influence importante dans la qualité des produits finis biologiques. En effet, le transformateur ne peut avoir recours à des agents chimiques pour corriger la qualité de ces intrants. La qualité des grains de blé réceptionné à l'usine de transformation conditionne donc la qualité de la farine biologique pouvant être produite. Il est donc nécessaire de suivre de manière rigoureuse les qualités et quantités des lots de grain de blé arrivants de chaque fournisseur.

Pour répondre à cette problématique, nous proposons un état de l'art sur les grains de blé et leurs spécificités (2.1), la chaine d'approvisionnement de la récolte aux usines de transformation au Canada (2.2) et les points de contrôles des grains de blé au niveau de la chaine d'approvisionnement au Canada (2.3). La section 3 présente la méthodologie de conception de l'outil de suivi pour les mouvements de grains de blé le long de la chaine d'approvisionnement. La section 4 expose un cas d'étude qui a servi à la validation de la méthode. Finalement, la section 5 rappelle les résultats et propose quelques perspectives pour l'utilisation de l'outil.

2 ÉTAT DE L'ART

Le secteur de la transformation alimentaire est un domaine complexe notamment en raison de la manipulation de matières premières vivantes. La qualité des grains de blé peut varier en fonction des variétés, de leur provenance, des conditions d'entreposage, du processus de mouillage des grains de blé, etc... Cette section va décrire les principales caractéristiques des grains de blé, la

chaîne d'approvisionnement, et les différents points de contrôles qualité du blé.

2.1 Caractéristiques des grains de blé

Deux principales sortes de blé sont plus largement cultivées [15] : le blé dur (durum) et le blé tendre (hard et soft). Le blé dur au Canada est utilisé pour la fabrication du couscous et des pâtes alimentaires. Le blé tendre au Canada est employé dans les boulangeries pour la fabrication du pain (blé tendre vitreux dit blé dur ou de force), de pâtisserie (blé tendre dit blé faible ou mou) et de la pâte à pizza. Les blés sont semés à différentes périodes de l'année en fonction des zones climatiques. Le blé de printemps est semé généralement autour du mois de mars (entre avril et mai au Québec) dans les régions où les conditions climatiques durant l'hiver sont plus rudes. Le blé d'hiver est généralement semé autour du mois d'octobre (entre aout et septembre au Québec) dans les régions méditerranéennes et tempérées. La récolte se déroule généralement en été par temps sec. Le grain de blé est situé dans un épi de blé et se compose de 3 parties distinctes [3] : le germe (≈ 3 % en masse) ; l'albumen ou amande farineuse ou endosperme (84%) et les enveloppes ou son (13%). Le germe est riche en matières grasses et en vitamines B et E, l'endosperme est principalement constitué de glucides (amidon) et de protéines (dont le gluten) et les enveloppes sont riches en fibres, mais nutritionnellement pauvres par rapport à l'endosperme [3]. La teneur en gluten est intimement corrélée avec la teneur en protéine. La teneur en protéine de blé varie en fonction des facteurs d'environnement alors que la qualité du gluten varie en fonction des facteurs héréditaires du blé [15].

Pour classifier ces blés, les principales caractéristiques analysées lors de la réception sont : le taux d'humidité (quantité d'eau présente au niveau du grain), le taux de protéine (le gluten est à l'origine de l'élasticité de la pâte et le taux de protéine est un des critères principaux pour fixer le prix du blé), le taux d'amidon (qui permet le gonflement de la pâte à pain [14]), les concentrations en toxines DON (désoxynivalénol) et OTA (Ochratoxine A) - les concentrations de ces toxines produites par certaines espèces de moisissures peuvent nuire à la salubrité des grains et des aliments [7] - et le poids spécifique des grains (indicateur déterminant le prix du grain [16]).

Des essais technologiques sont réalisés pour obtenir de l'information plus précise sur la qualité de ces grains de blé. Lors des essais technologiques, un des indicateurs clés informant sur la qualité des grains de blé pouvant impacter le prix d'achat est le BEM (Brabender Energy Max), qui se mesure grâce au Glutopeak. Le Glutopeak est un appareil de mesure pour tester la qualité du gluten [2]. Plus le BEM est élevé, meilleur est la qualité du gluten et donc de la farine.

2.2 Chaine d'approvisionnement de la récolte du grain de blé aux usines de transformation

Entre la récolte du grain de blé et sa transformation en farine, le blé suit un long processus au cours duquel il sera manipulé et stocké. [15] précise que « la généralisation du moissonnage-battage a conduit au développement d'une infrastructure, concrétisée par la mise en place des installations (bâtiments et équipement) en fonction de la réception, du séchage, du nettoyage, de la désinfestation et de l'expédition ». Le moissonnage-battage est l'opération qui consiste à récolter les grains de blé ou tout autre type de céréale dans un champ à l'aide d'une moissonneuse-batteuse. La moissonneuse-batteuse aura ainsi pour rôle de couper les tiges de blé et battre le blé pour extraire les grains de blé des épis de blé. Le processus pour acheminer ces grains à l'usine de transformation (Figure 1) débute aussitôt que les grains de blé sont récoltés (1).

À l'étape 2, le blé est transporté jusqu'aux silos de collecte (3). Un échantillon est prélevé et analysé pour l'émission de certificat d'analyse (4). Cette étape permet d'identifier le type de blé et vérifier la qualité du blé. Le blé est transporté (5) dans un « silo terminus » (6) où il sera entreposé, nettoyé et séché avant d'être expédié (7) à l'acheteur (8).

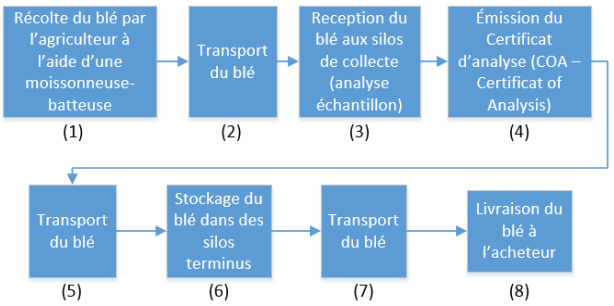


Figure 1: Processus simplifié de l'approvisionnement en grain de blé

Les commandes de blé passées à l'agriculteur se font par rapport aux besoins de l'usine de transformation de manière à couvrir les besoins en matières premières pour la production. Le transport des grains suit un processus rigoureux. Le blé peut transiter à travers un centre de grain, une plateforme de chargement ou être acheminé directement à l'usine de transformation.

La Commission canadienne des grains précise les règlements à suivre pour le stockage du blé [9] et le transport des grains [10]. La Commission canadienne des grains propose également un système de classement par grain et d'inspection permettant d'identifier la qualité du grain et assurer sa commercialisation [8].

2.3 Contrôle de la qualité du grain de blé au niveau du processus d'approvisionnement

D'après la Loi sur les grains [8], la commission canadienne des grains est responsable de l'approbation des normes de classification ainsi que des critères

d'inspection [5]. L'inspection est réalisée par plusieurs prises d'échantillons [6], en établissant un classement et en délivrant une certification d'analyse des lots de blé. Les analyses sont réalisées pour les grains manipulés aux silos de collecte et de terminus. Les échantillons représentatifs du lot de blé réceptionné sont prélevés à l'entrée des silos directement depuis les véhicules de transport à l'aide d'une sonde mécanique. L'analyse regroupe de nombreuses informations telles que : le taux d'impuretés (pailles, pierres, brindilles…) ; masse spécifique du grain ; taux d'humidité ; taux de protéine ; la catégorie (printemps ou hiver) ; la présence de graines étrangères ; la condition du grain (apparence, maturité…) ; la classe (blé roux de printemps de l'Est canadien, blé roux de printemps Canada Prairie…) [4]; l'aspect (vitreux ou translucide). À partir de ces analyses, le responsable de silo détermine le grade du blé. Il est alors possible de déterminer le silo dans lequel le lot de blé sera entreposé. Avant d'être entreposé dans le silo approprié, le lot de blé réceptionné subira une étape de pré-nettoyage afin de retirer un maximum de matières étrangères.

Un processus de séchage est parfois nécessaire lorsque le taux d'humidité dépasse 14,5 % à des fins de conservation. Il faut toutefois surveiller à ne pas décolorer, fissurer ou endommager le grain lors du séchage [15]. Le long de la chaine d'approvisionnement, le blé peut être stocké à divers endroits. Il est important de veiller aux conditions environnementales ainsi que les propriétés des grains de blé qui peuvent altérer leur qualité. Les moisissures, les insectes parasites, les acariens, les rongeures, les altérations d'origine mécanique (fissure, cassure des grains) peuvent causer une altération de la qualité du grain lors du stockage [15]. Une bonne conservation du blé nécessite de préserver l'intégrité des protéines notamment le gluten et de maintenir le pouvoir germinatif du grain (un grain non germé).

Avant toute commande, pour s'approvisionner en blé, le meunier réalise des analyses sur un échantillon provenant des silos afin de vérifier le type et la qualité du grain. Une fois l'échantillon accepté, le blé peut être livré. Une dernière inspection est réalisée lors de la réception des grains de blé à l'usine de transformation.

3 METHODOLOGIE

De nombreuses données sont capturées le long de la chaine d'approvisionnement informant sur la qualité des grains de blé, les quantités entreposées ou en mouvement. Pour une meilleure intégration et un meilleur suivi des flux d'approvisionnement des grains de blé entre les fournisseurs, les intervenants gérants les stocks de matière première et la production, nous proposons de développer un outil intégrant l'ensemble des données pertinentes dans une base de données. Pour construire cet outil, permettant un meilleur suivi des grains de blé biologique à partir de la capture des données sur la chaine de valeur, une méthodologie a été suivie rigoureusement.

La méthode se compose de 3 phases détaillées ci-dessous. Le déroulement complet de la méthode permet d'avoir un meilleur suivi ainsi qu'une meilleure traçabilité de l'information.

3.1 Cartographie de l'approvisionnement

Dans cette première phase, il s'agit d'observer et de documenter les tâches effectuées par chaque individu participant dans le processus d'approvisionnement. Les symboles standardisés ANSI (institut national de normalisation américain) [11], sont utilisés pour la représentation graphique de la cartographie. Avec un flux du processus d'approvisionnement assez linéaire et impliquant assez peu d'intervenants, le formalisme de modélisation ANSI a été choisi pour réaliser la cartographie.

La cartographie du processus permet de mieux comprendre les interactions et d'identifier les différentes données utilisées. La cartographie réalisée représente les processus actuels de niveau intermédiaire et montre la séquence des activités, mais ne décrit pas les tâches de chacune des activités à un niveau détaillé [12]. Le but est d'analyser chaque processus et d'identifier les goulots d'étranglement potentiels, les taches jugées répétitives, n'apportant aucune valeur ajoutée. La démarche suivie pour construire la cartographie a été de :

1. Récupérer des documents de cartographie existants au sein de l'entreprise (si disponibles) ;
2. Choisir une étape spécifique du processus ;
3. Observer et questionner sous forme d'entrevue semi-dirigée l'activité qui est réalisée par la personne ressource ;
4. Passer à l'activité suivante et répéter l'étape 3 pour obtenir une séquence d'activité jusqu'à l'état final du processus.

L'étape 3 a pour objectif de récupérer un maximum d'information. Les informations doivent permettre de connaitre : l'action de la tâche effectuée ; les types de données manipulés ; les documents créés ; les moyens de transmission des informations à partager ; les départements ou ressources externes à qui l'information est transmise.

3.2 Création de bases de données et d'interfaces

La cartographie réalisée à la phase 1 permet d'observer la séquence des activités et les types de données collectées le long du processus d'approvisionnement. Afin d'éviter toute redondance d'information et s'assurer de partager les bonnes informations à jour à d'autres utilisateurs, la création d'une base de données est nécessaire pour remplir les deux besoins précédemment évoqués.

Une méthode de type agile a été appliquée afin de mettre en opération rapidement les outils développés tout en gardant une flexibilité sur la structuration et les différents besoins de chaque utilisateur. Les bases de données construites et prêtes à être utilisées seront améliorées de manière itérative à travers des retours d'expériences des utilisateurs. Il est important de se questionner sur l'utilité de chaque type de données et garder le strict minimum

nécessaire comme donnée pour le bon suivi des grains de blé le long de la chaine d'approvisionnement.

L'approche proposée pour construire la base de données ainsi que l'interface se déroule comme ci :

1. Observer à partir de la cartographie réalisée la séquence d'activité et la simplifier si possible ;
2. Regrouper les types de données utilisés par les utilisateurs ;
3. Lister l'ensemble des utilisateurs futurs nécessitant un accès à la base de données ;
4. Communiquer avec chacun des utilisateurs concernant leurs besoins ;
5. Partager les responsabilités et définir les niveaux d'accès de chaque utilisateur ;
6. Modéliser l'outil et les différentes interfaces (formulaire, base de données, rapport)
7. Mettre en service l'outil ;
8. Améliorer l'outil en fonction des besoins et retours d'expériences des utilisateurs ;
9. Rédiger une documentation mentionnant les responsabilités de chacun et présentant l'utilisation des différentes interfaces crées.

3.3 Créer des indicateurs et des tableaux de bord

À partir de la base de données structurée, il est par la suite possible de créer des indicateurs de performance. Ces indicateurs vont permettre de faire un suivi, motiver le personnel, fixer des objectifs à atteindre tout en permettant de comprendre les causes de mauvaise performance. Les tableaux de bord sont des interfaces permettant de rassembler les indicateurs pertinents en une seule page et d'avoir une vue en temps réel de l'information sur des enjeux clés du processus. L'agrégation de données permet de prendre de meilleures décisions plus rapidement. Le développement d'indicateurs et de tableaux de bord s'appuie sur des besoins réels de visualisation et de synthétisation des informations à différents niveaux de l'organisation. La démarche suivie pour créer des indicateurs et des tableaux de bord a été de :

1. Comprendre les besoins des utilisateurs ;
2. Comprendre les données, les tables et les relations existantes (dans le cas d'une base de données relationnelle) dans la base de données étudiée ;
3. Créer des indicateurs qui répondent aux besoins de l'étape 1 et annoter les types de données manquantes nécessaires pour répondre aux besoins évoqués ;
    a. En cas de données manquantes, étudier les différentes possibilités pour collecter ces données sinon passer à l'étape 4 ;
    b. Intégrer ces données dans une ou plusieurs tables de la base de données ;
    c. Créer les relations dans la base de données entre les tables ;
4. Créer des tableaux de bord à partir des indicateurs créés à l'étape 3 (création d'une interface visuelle).
5. Valider les tableaux de bord auprès des utilisateurs

Les résultats de chacune de ces étapes sont présentés dans le chapitre suivant.

4 CAS D'ETUDE

4.1 Contexte industriel

L'outil développé pour le suivi des grains de blé a pour objectif de répondre à un besoin d'une entreprise de transformation de grain de blé, qui dans notre cas d'étude est La Milanaise. Cette PME québécoise se spécialise dans la production de farine biologique.

Pour le stockage de ses données, notamment pour la chaine d'approvisionnement qui nécessite une collaboration entre différents intervenants s'occupant de l'entrepôt des grains ou du transport, La Milanaise utilise le logiciel Smartsheet. Smartsheet est une plateforme hébergée sur le nuage informatique offrant la possibilité aux entreprises de planifier, capturer, gérer, automatiser et générer des rapports sur les travaux en cours de réalisation.

Depuis les dernières années, La Milanaise connait une forte croissance des ventes. Elle veut suivre de manière optimale les grains de blé sur sa chaine d'approvisionnement pour être en mesure de gérer des flux plus importants et éventuellement améliorer son fonctionnement. Pour cela, une cartographie du processus d'approvisionnement des grains à l'usine a été réalisée.

4.2 Cartographie de l'approvisionnement

Pour débuter ou continuer notre cartographie, nous choisissons une activité spécifique dans le processus d'approvisionnement, par exemple une commande de grains de blé. Dans notre cas, pour les blés provenant du Québec, des ententes doivent être signées entre La Milanaise et l'agriculteur. De nouveaux agriculteurs peuvent contacter La Milanaise pour vendre leur blé ou La Milanaise peut contacter les agriculteurs présents dans son registre. Sous forme d'entrevue semi-dirigée, nous demandons au responsable acheteur :

- Par quels moyens se fait la prise de contact.
- Quelles informations sont collectées ainsi que les fichiers créés et utilisés pour sauvegarder ces informations.
- Quels utilisateur ou département ont besoin de l'information sauvegardée au sein de La Milanaise.
- Comment l'information est transmise.

Les réponses à ces questions aident à documenter l'activité représentée sur la cartographie (Figure 2).

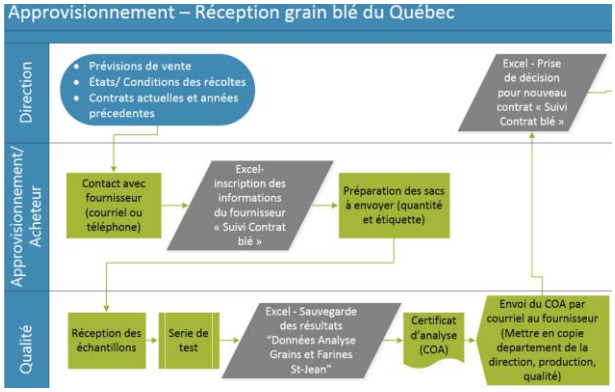


Figure 2: Construction de la cartographie de l'approvisionnement des grains de blé du Québec

Une fois la commande passée, on passe à l'activité suivante en interrogeant et observant ce que le responsable de l'approvisionnement doit réaliser. On continue ces étapes jusqu'à ce que la commande de grain de blé soit arrivée à l'usine de La Milanaise.

La cartographie de la chaine d'approvisionnement résume l'ensemble des opérations suivies par les grains de blé de la récolte au champ de blé jusqu'à l'usine de transformation, spécifiquement pour La Milanaise. On retrouve sur cette cartographie les points de collectes de données, les points de contrôles et les différents intervenants dans la chaine d'approvisionnement. Cette cartographie est nécessaire pour regrouper par la suite les données collectées dans des bases de données.

4.3 Création de bases de données et d'interfaces

En analysant la cartographie, on constate que les résultats des analyses des échantillons et les contrats étaient inscrits sur un fichier Excel, sauvegardé sur un serveur de la compagnie. On souhaite créer une base de données pour centraliser, unifier et partager l'information aux utilisateurs. 5 informations (Nom fournisseur, Nom contact, Courriel, Numéro cellulaire, Adresse postale) étaient redondantes et pouvaient être considérées comme des objets statiques faisant partie d'élément organisationnel. Une première base de données regroupe les informations des agriculteurs. Une deuxième base de données regroupe les résultats d'analyses des échantillons de grains de blé provenant de chaque agriculteur. La base de données a été configurée sur Smartsheet. La plateforme n'étant pas une base de données relationnelle, un script python a permis de faire ces relations fictives (Figure 3) permettant d'avoir une mise à jour rapide des listes déroulantes.

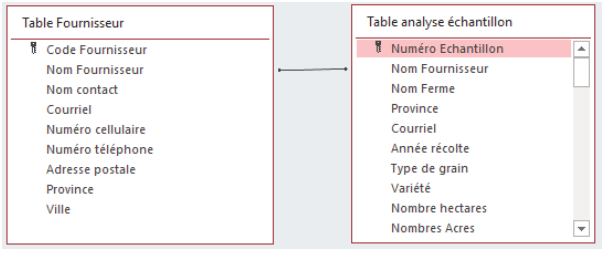


Figure 3: Relation fictive entre la table fournisseur et la table analyse échantillon

Les résultats d'analyses entrés et sauvegardés dans la base de données ont permis de semi-automatiser la production, la sauvegarde et l'envoi de certificats d'analyse.

Une base de données a été construite au niveau d'un centre de grain (Figure 4), en s'appuyant sur les modèles précédents utilisés. Deux feuilles Excel étaient utilisées pour les transactions. Chaque feuille comprenait 15 colonnes. La base de données (Figure 4) a permis de regrouper l'ensemble des ces données sous 24 entités et de créer une relation avec la table analyse échantillon pour connaitre la qualité de blé manipulé au centre de grain. 6 nouvelles entités ont donc été rajoutées en créant une relation unique à partir du numéro d'échantillon. En listant les utilisateurs à partir de la cartographie et en échangeant à travers des réunions impliquant les départements interne et intervenant externes, nous identifions 14 utilisateurs. Les réunions permettent de définir les besoins de chacun ainsi que leurs responsabilités. Les responsabilités définissent les droits d'accès de chaque utilisateur à la base de données. Des formulaires sont créés pour permettre l'ajout de nouvelles transactions.

La Figure 4 montre les lignes de transaction de grain de blé entrant (définis par une couleur verte) et sortant (couleur rouge) d'un centre de grain de blé. Des « Cut-off » peuvent intervenir pour remettre à niveau le Silo vide, dû à des mouvements de grains « non nettoyés » en tonne métrique. Finalement les retours d'expériences ont permis d'améliorer l'outil, s'assurer que l'ensemble des besoins importants des utilisateurs soit comblé et que le suivi des grains de blé soit possible.

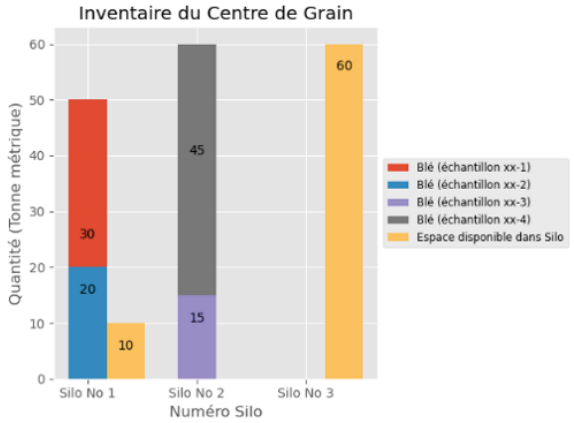
Reference number	Projected IN/OUT date	Shipping/ Delivery date	Scale tkt #	IN or OUT	Delivery/ Shipping Weight (MT)	Silo number at NuVision	Silo Transfered to at Nuvision	Inventory	Transport mode	Sample No
00010		31/10/19	25871	IN	43.92	Silo No 1		0.000		
00011	08/11/19	14/11/19	25967	IN	42.47	Silo No 1		0.000	Container	Échantillon xx-1
00012	08/11/19	14/11/19	25955	IN	44.32	Silo No 1		0.000	Container	Échantillon xx-1
00013	11/11/19	14/11/19	25956	IN	44.45	Silo No 1		0.000	Container	Échantillon xx-1
00014	11/11/19	14/11/19	25960	IN	43.88	Silo No 1		0.000	Container	Échantillon xx-1
00015		14/11/19	25968	OUT	20	Silo No 1		Done	Container	Échantillon xx-1
00016	12/11/19	15/11/19	25974	IN	44.37			0.000	Rail	Échantillon xx-2
00017	12/11/19	15/11/19	25977	IN	43.87			0.000	Rail	Échantillon xx-2
00018		15/11/19	N/A	OUT	88.24			Done	Rail	Échantillon xx-2
00019		15/11/19	25980	OUT	27.29	Silo No 1		Done	Container	Échantillon xx-1
00020		15/11/19	25983	OUT	26.18	Silo No 1		Done	Container	Échantillon xx-1
00021		18/11/19	25988	OUT	27.32	Silo No 1		Done	Container	Échantillon xx-1
00022		19/11/19	26001	OUT	26.32	Silo No 1		Done	Container	Échantillon xx-1
00023		26/11/19	26067	OUT	1.99	Warehouse		Done	Container	
00024		26/11/19	26068	OUT	25.19	Silo No 2		Done	Container	Échantillon xx-3
00025		27/11/19	26076	OUT	24.93	Silo No 2		Done	Container	Échantillon xx-3
00026		28/11/19	26078	OUT	10.58	Warehouse		Done	Container	
00027		28/11/19	26077	OUT	12.54	Silo No 2		Done	Container	Échantillon xx-3
		01/12/19		Cut-off	0.74	Silo No 1		Done		
		01/12/19		Cut-off	-0.15	Silo No 2		Done		

Figure 4: Mouvements au sein d'un centre de grain

4.4 Indicateurs et tableaux de bord

La cartographie a permis d'identifier les points de collectes de données ainsi que les étapes clés de transportations du blé de la récolte jusqu'à l'usine de transformation. Des bases de données ont ainsi pu être construites pour regrouper certaines informations collectées le long de la chaine d'approvisionnement. À partir des bases de données, il est maintenant possible de développer des

indicateurs. La première étape énumérée dans la méthodologie consiste à comprendre les besoins spécifiques d'utilisateurs pour développer des indicateurs utiles. Un besoin de suivre les inventaires et les types de blé répertoriés, par numéro de lot d'échantillon, était souhaité par la direction, pour connaitre la qualité des grains de blé en stock ou en mouvement. Les centres de grains n'indiquent pas la qualité de blé qu'il envoie à La Milanaise ou qu'il entrepose.



Numéro échantillon	BEM
Échantillon xx-1	55
Échantillon xx-2	57
Échantillon xx-3	48
Échantillon xx-4	49

Figure 5: Exemple d'indicateurs visuels pour le suivi des inventaires d'un centre de grain

Des indicateurs ont donc été créés de manière à connaitre les quantités de grains de blé restant et l'espace disponible dans chacun des silos. L'ensemble des informations nécessaires à la création des indicateurs se retrouve dans la base de données du centre de grain. Ces indicateurs sont construits par de simples calculs à partir des informations collectées dans la base de données.

Pour connaitre les types et quantités de blés présents, un script python a dû être développé. Ce script calcule l'inventaire toutes les 30 minutes à partir des transactions inscrites dans la base de données, dans la colonne « Inventory » de la base de données, par le concept « Dernier entré – Premier sorti » adapté à l'écoulement des grains de blé dans les silos. Ce script modifie les quantités restantes de chaque lot de blé.

À partir des données enregistrées dans la base de données ainsi que des indicateurs créés, un tableau de bord a pu être construit spécifiquement pour un centre de grain (Figure 5). Ce tableau de bord permet de synthétiser l'information et partager celle-ci aux personnes concernées. Le tableau de bord du centre de grain met à disposition : des formulaires pour entrer de nouvelles transactions ; la base de données regroupant l'ensemble de transactions ; des indicateurs visuels sur l'inventaire des silos réservés à La Milanaise ; un tableau précisant le type de blé, sa quantité ainsi que sa qualité restant dans les silos. Finalement la synthétisation de l'information de l'inventaire des grains de blé en temps réel permet de prendre des décisions plus rapides et donc une meilleure réactivité dans la chaine d'approvisionnement.

5 CONCLUSION

Un outil pour le suivi des grains de blé au niveau de la chaine d'approvisionnement a été développé, basé sur une méthode en 3 étapes : (1) la cartographie du processus d'approvisionnement, (2) la création de bases de données et d'interfaces et enfin (3) la création d'indicateurs et de tableaux de bord. La méthodologie a pu être appliquée sur un cas d'étude avec une PME spécialisée dans la production de la farine biologique.

Les résultats obtenus ont permis d'avoir un meilleur suivi des grains de blé au niveau d'un centre de grain de blé et d'offrir une meilleure réactivité des différents intervenants sur la chaine d'approvisionnement. Le tableau de bord précise à l'utilisateur du centre de grain le numéro de référence du blé qu'il envoie à l'usine. Le numéro de référence permet de suivre très simplement les types et qualités de blé en mouvement. Le suivi des types et qualité de blé est important pour la planification de la production, du réapprovisionnement des silos et l'achat de nouvelles matières premières. Le rendement et la qualité des produits finis obtenus suite au processus de transformation des grains de blé sont directement impactés par la qualité des matières premières.

L'outil développé démontre la faisabilité et l'intérêt de suivre, partager les informations captées le long de la chaine d'approvisionnement dans le secteur de la transformation des grains. Il devra cependant être étendu à d'autres centres de grain et entrepôts pour inclure l'ensemble des intervenants de la chaine d'approvisionnement et prendre en compte les différents lieux de provenance des grains de blé jusqu'à l'usine de transformation. Le résultat final permettra d'avoir une vue globale des inventaires et une meilleure planification pour le réapprovisionnement des stocks.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier notre partenaire industriel, La Milanaise, d'avoir participé au développement de cet outil ainsi que le MAPAQ (projet IA119053) pour leur soutien financier.

REFERENCES

[1] Aitken, R., Watkins, L., Williams, J., & Kean, A. (2020). The positive role of labelling on consumers' perceived behavioural control and intention to purchase organic food. *Journal of Cleaner Production, 255*

[2] Bakerpedia. (2019). GlutoPeak.

[3] Campbell, G. (2007). Chapter 7 Roller Milling of Wheat. In *Particle Breakage* (Vol. 12, pp. 383-419).

[4] Commission canadienne des grains. (2019). Classes de blé canadien.

[5] Commission canadienne des grains. (2019). Guide officiel du classement des grains, Blé: Classes et variétés.

[6] Commission canadienne des grains. (2019). Inspection officielle du grain.

[7] Commission canadienne des grains. (2019). Modifications au Règlement sur les grains du Canada (Indice de chute (IC) et désoxynivalénol (DON) comme facteurs officiels de classement des grains).

[8] Loi sur les grains du Canada - Partie 2 - Classement et inspection des grains, (2020).

[9] Loi sur les grains du Canada - Partie 5 - Installations, négociants en grains et manutention du grain, (2020).

[10] Loi sur les grains du Canada - Partie 6 - Transport du grain, (2020).

[11] Harley R. Myler. (1998). In C. U. Press (Ed.), *Fundamentals of Engineering Programming with C and Fortran* (pp. 32–36).

[12] HEC Montréal. (2013). Modélisation et diagnostic des processus (actuel).

[13] Hemmerling, S., Hamm, U., & Spiller, A. (2015). Consumption behaviour regarding organic food from a marketing perspective—a literature review. *Organic Agriculture*, 277–313

[14] Li Vigni, M., & Cocchi, M. (2013). Near infrared spectroscopy and multivariate analysis to evaluate wheat flour doughs leavening and bread properties. *Analytica Chimica Acta, 764*, 17-23

[15] Ménard, G. (1992). *Le Blé: éléments fondamentaux et transformation* (P. U. Laval Ed.).

[16] Wilkinson, J. M., Miller, H. M., McCracken, K. J., Knox, A., McNab, J., & Rose, S. P. (2003). Effect of specific weight on the metabolizable energy content of four cultivars of wheat grain in ewes. *Animal Feed Science and Technology, 105*, 215-224

SIMULATION MODEL FOR THE DECONTAMINATION OF SURGICAL INSTRUMENTS AND ANALYSIS OF AUTOMATION SCENARIOS

M. Ghiyasinasab, N. Lahrichi

Polytechnique Montréal
2920, chemin de la Tour, Montréal,
Marzieh.ghiyasinasab@polymtl.ca
Nadia.lahrichi@polymtl.ca

N. Lehoux

Laval University
1065, avenue de la Médecine,
Québec, Canada
Nadia.lehoux@gmc.ulaval.ca

X. Elie-Dit-Cosaque

490, Boulevard Armand-Paris,
Québec, Canada
Xavier_Elie-Dit-Cosaque@steris.com

ABSTRACT: In hospitals, decontamination centers are required to sort, disinfect, package, and sterilize surgical instruments prior to their return to the operating rooms. The market trend is to automate this function to increase the level of productivity, reduce the risk of human error and minimize the risk of musculoskeletal injuries related to the handling of heavy loads. The goal of this research is to study the automation of a decontamination center and the use of automated guided vehicles (AGV) to make the system more efficient and safer. A simulation model of the current system with manual transfers is compared with a scenario using two AGVs for instrument transfers. Results show that this automation of the decontamination unit could lead to the reduction of both treatment time and work in process while increasing the service level. It is worth mentioning that this article contributes to the field of using simulation and system analysis to evaluate and facilitate healthcare systems adaptation based on the Industry 4.0 concepts and its role to improve process flows and ergonomic conditions for employees.

KEYWORDS: *Central Sterilization Department, Simulation, Automation, Industry 4.0, Automated Guided Vehicle*

1 INTRODUCTION

Decontamination of reusable instruments and other articles that have been used for medical purposes on patients is a pivotal activity in hospitals. Nowadays in most hospitals, there is a central sterilization department (CSD) to execute this function. The instruments come from operating rooms, clinics, and emergency rooms at various rates. The size and density of arriving packages as well as the required treatments vary for different medical specialities. Employees responsible for cleaning them are called upon to perform specific and sequential tasks as well as carrying heavy loads that can cause musculoskeletal problems in the long term.

Various solutions exist in the industry to move racks in a CSD. Among the common solutions provided by the industry are conveyor systems that can come with or without automated loading/unloading systems for the washers. However, these solutions still require an operator to manipulate racks with transfer carts. More recently, an automated solution based on an Automated Guided Vehicle (AGV) was developed, eliminating these rack manipulations. Use of AGVs in a CSD goes along the new trend of fourth industrial revolution (Industry 4.0), which is based on concepts such as cyber-physical systems, internet of things, digitalization, smart technologies, automation, and robotics (Molino *et al.* 2020). Barcodes help the robot identify the racks and the washer cycle. The programming system links the main objects and instruments and is traceable.

According to Molino *et al.* (2020), new technologies can make changes in how organizations operate and how people learn and do their work. Hence system analysis and simulation methods can play a key role through the organization of digital and technology transfers. Simulation also provides a decision-making tool for the users of new technology by validating the various effects it would have on their system.

Creating a simulation model for a CSD is a complex modelling work as several activities must be considered. Each instrument used during interventions must be cleaned to remove any form of contamination. Each instrument is different and is often dedicated to an intervention. Their availability must be guaranteed when carrying out the intervention. To our knowledge, the internal logistics of a CSD or combining a robot with human resources has not been considered in any previous research.

The goal of this paper is therefore to provide a simulation model for a CSD system to analyse various scenarios, especially the introduction of automation and robotic transfers. To achieve this goal, the CSD process was analysed and a simulation model was created. A time-and-motion study was conducted for a case-study in Quebec, Canada which had the possibility of using the first prototype of an AGV. Notability of designed AGV is its connection with racks to recognize instruments' attributes and developing an integrated machine to machine interaction. The simulation model was validated by applying it to the case-study with a high level of detail. The scenario using an AGV to transfer racks was analysed. Compared with the current situation, use of an AGV showed promising improvements in total time of treatment which is an important factor in the service level. This study contributes to the literature on industry 4.0 concepts by combining simulation and automated solutions to improve the healthcare system. For the CSD under study, the analysis results will orient decisions about applying this technology and the simulation pro-

vides an analysis and decision-making tool for future opportunities to increase their productivity, quality and safety. In the remaining parts, a brief literature of simulation of CSDs is presented which is followed by a description of a CSD system, the methodology and simulation model, results of the tested scenario, a discussion, and conclusion.

2 LITERATURE REVIEW

In hospitals, there are complex and interrelated departments with a high level of uncertainty. Simulation is appropriate to analyze and predict the elements in the hospital system by providing a statistically accurate tool (Centeno *et al.*, 2003). Various studies used simulation to model healthcare systems, especially the patient flow through different hospital departments (Mascolo and Gouin 2013). However, few studies simulated the sterilization of medical devices in CSDs. In the review of Discrete event simulation in healthcare presented by Gunal and Pidd (2010), no article regarding simulation of CSDs was mentioned.

In a master thesis, Ethier (2003) presented a simulation model for a CSD and analysed the effects of increasing the number of arrival trays. They validated their model with the Royal Victoria Hospital in Montreal, Canada. They analysed the scenarios of adding or removing instruments from specific clinics or surgeries and compared the average service level in each scenario. Ngameni (2014) provided a Mont-Carlo simulation of a CSD in Montreal and analyzed the scenario of using a case cart system. Case cart system is about to create a cart with all the medical devices necessary for a specific operation (Bonnefoy, 2015). They considered the transfers from operating rooms to the CSD and the steps needed to apply the case cart system. They could estimate how many case carts were required and the potential increase in capacity. Mascolo and Gouin (2013) proposed a generic simulation model to represent sterilization services in sterilization establishments in the Rhône-Alpes region in France. They used the generic model to compare the performance of several sterilization services. Existing literature provides examples of simulation of CSDs represents the process flow in this system. However, there is a gap concerning the internal transfers within the CSD and its effects. This study contributes to the literature by providing a simulation model including a very precise level of detail that can be also applied to analyze scheduling, capacity planning, work shifts and other scenarios. Another value of the presented model is the possibility of generalization to be applied to other centers. Literature concerning the application of simulation modelling in Industry 4.0 concept, is rather novel. For example, Angelopoulou et al. (2020) explored the impact of human error on Industry 4.0 by presenting a simulation model. Their work considers performance shaping factors that affect human work in a complex Industry 4.0 system. One of the limitations of these studies is the lack of real-world case studies. Our presented simulation model for a real-case for automated transfer with the potential of future expansions may be viewed as another step to enrich the research in the system analysis of industry 4.0 revolution.

3 PROBLEM DEFINITION AND CASE STUDY

The main objective in a CSD is to sterilize the medical instruments, removing any risk of contamination, without delay for their re-use. In order to avoid contamination, soiled and sterilized devices must be separated and therefore a CSD includes three sections for decontamination, sterilization and storage. Pre-disinfection by hand and disinfection in washer machines are performed in the decontamination section, while packaging and sterilization are performed in the sterilization section. The main equipment of a CSD include washers, drying cabinet, and autoclaves for sterilization. There is other equipment such as ultrasonic washers and hydrogen peroxide sterilization which are used for a smaller percentage of instruments based on their characteristics (e.g., instruments having low tolerance to high temperatures). The washers are loaded in the decontamination section and unloaded in the sterilization section. There is a window between the sections to return empty racks from sterilization to decontamination. In some centers, a case cart system is used which consequently needs a cart washer machine. For flexible endoscopes, there are special washers that are used in some centers. The level of automation varies in centers such as using a cart washer, endoscope washer or scanner system for traceability of equipment. Figure 1 summarizes the principal sterilization cycle.

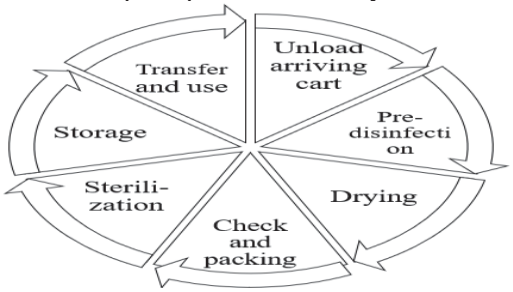


Figure 1. Cycle of processes in a CSD

The case-study of this research is a center with the capacity of treating around 300 instruments per week. It does not have a case-cart system. The other main processes are the same as general CSD processes. The first activity after receiving the group of instruments in a cart is to empty the cart and separate the instruments. Four main groups of medical instruments are typically used: container, tray, basin, and peel packed individual instruments (see figure 2).



Figure 2. Main groups of instruments in a CSD

Containers include the container box and a tray with the instruments inside. Container boxes and basins go

directly to the washers. Trays and instruments need a pre-disinfection process before going to the washer. Items are placed in racks for the washer. The capacity of a rack is 4 basins or 5 containers. The capacity of racks for trays is 8 and 9 individual instruments are considered as 1 tray.

After unloading the racks from the washer in the sterilization section, some of the instruments will need a drying process. Container boxes and their trays are put together and packed. Other instruments are also packed and finally, a batch of instruments are put in the autoclave for sterilization. After the autoclave, the instruments are stored and wait to be delivered.

There are many challenges in CSD work. The quality of sterilization is essential as any mistake might affect patients. Some instruments are unique and might need to be used on the same day so it is important to reduce the waiting time. Moreover, staff must constantly load, unload and move full racks of items. This highly physical work might affect staff's health in the long run, and it is one of the reasons many quit after some years. Also, when a washing cycle finishes staff must interrupt their tasks to unload and reload the washer which leads to lack of concentration and productivity. The latter problem has affected the center under study severely. During the rush hour, it is difficult for staff to constantly stop what they are doing to transfer, load and unload the racks. Figure 3 illustrates the process flow in the CSD understudy. In the process flow, transfers (arrows) and processes which can be replaced by the robot are shown in gray colour.

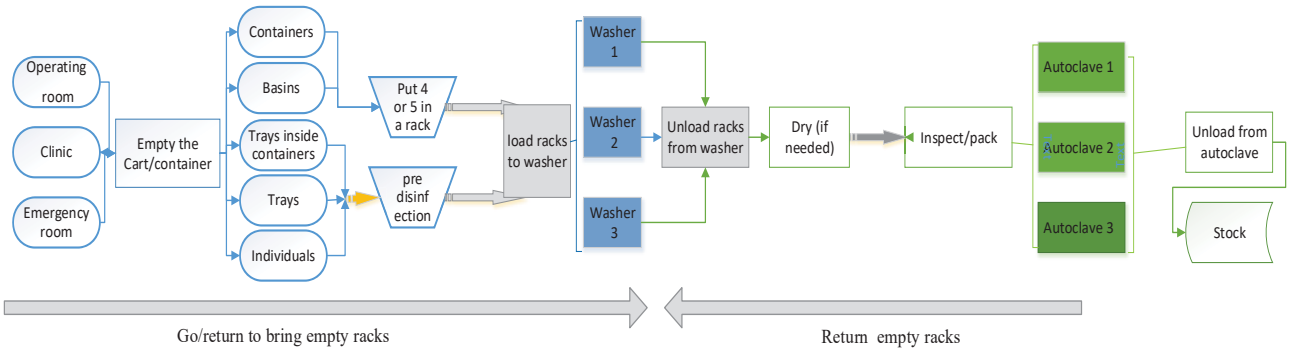


Figure 3. Process flow in CSD under study

4 METHODOLOGY AND MODEL

4.1 Building Simulation Model

This research followed the typical methodology associated with the development of a simulation model (Kelton *et al.*, 2015). First, the CSD under study was visited and analyzed. Value stream mapping and process flows were created to illustrate resource and material flows. A time-and-motion study was also conducted for the different operations of the CSD unit. The work schedule and some statistics were furthermore extracted from the CSD database system. Rate of instrument arrivals, staff schedules (hours, number, specialities), process time, transfer time, number of outputs (number of instruments leaving the system), the capacity of equipment, batch numbers, and many other details of the work were gathered. Part of data was gathered by observation and time-study (process times, arrival times,…), another part was gathered by asking for documentation (surgery schedules, autoclave capacity,…) and some by a combination of observation and interviews with staff and supervisor (role of staff, process flow,…). Data gathering covered a period of almost 4 months. An initial simulation model was next created, illustrating the current (i.e., as-is) situation of the CSD under study. After creation of the model using Arena simulation software (version 15), it was validated by comparing the results with real data, statistical tests, and face-to-face meetings with the supervisor of the CSD. Then, performance factors were defined to analyze the performance of the system. The main scenario concerning the use of AGVs for instrument transfers was finally tested and the results compared to the as-is case where instruments are moved manually. Figure 4 summarizes the methodology of this study. Some alternative methodologies include Mont-Carlo simulation (Ngameni 2014), generic simulation model (Mascolo and Gouin 2013), optimization (Gunal and Pidd 2010), and simulation-optimization (Centeno et al., 2003). Mont-Carlo simulation does not seem an appropriate method for our study because of its limitation on visualization and testing various scenarios. Optimization is not considered for the primary level as analyzing the system and scenarios is the priority of this research before finding optimal solutions. Expanding this study by creating a generic simulation and a simulation-optimization model to optimize the scheduling are under process to be accomplished in the future.

Instruments from operating rooms arrive every hour during opening hours. There are four additional deliveries every day (three during opening hours of the clinics and one after 6 p.m. from the emergency room). There are three working shifts for staff: day, evening and night. One employee in the sterilization section starts earlier in the morning to test autoclaves before the day shift starts. The number of employees for the first, second and third work shifts are respectively 3, 5, and 1

in the decontamination section and 2, 4, 1 for the sterilization section. There are two employees responsible for autoclaves (one for the day shift and one for the evening shit).

Distribution of arriving instruments was modelled based on a Poisson distribution with a different mean (λ) for each arrival time, for each instrument. The distributions were also different for each day of the week. For example, the distribution of a container for the first arrival at 9 a.m. on Mondays is POIS(2) while distribution for the second arrival at 10 a.m. is POIS(5). This situation is called nonstationary Poisson arrival (Kelton *et al*., 2015). Sequences for rack transfers and distances between stations are modeled using transfer modules. Records and write modules are applied to track the results and numbers to check the process also have more detailed output and results.

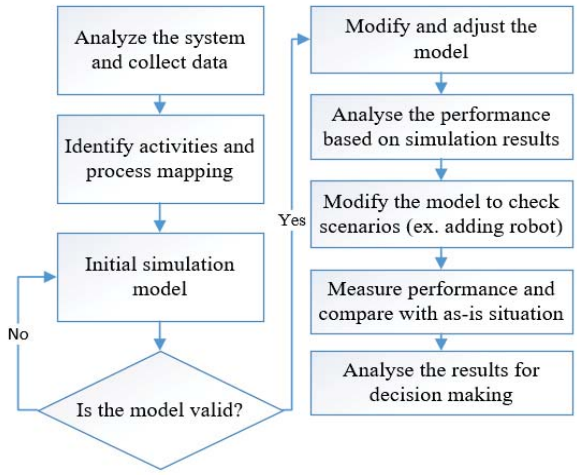


Figure 4. Methodology

4.2 Verification and Validation of the Model

To verify the model, the details were added step by step and the model was verified at each step. Some of the methods applied for validation were output files to read the number of arrivals and items processed, a pause on the entities to follow their status during the model run, as well as changing the elements to check the logic of changes on the results. The simulation model illustrating the current situation of the CSD studied was first run for one week (5 working days) with a 4-hour warm-up time and 10 replications. The number of outputs for each replication was recorded in detail for each instrument for each day of the week. These values were used to calculate the run number required to achieve a reliability level of ± 2.26 when building a 95% confidence interval. The formulation used was

$$N(m) = \left\lceil \frac{s(m)t_{m-1,1-\alpha/2}}{\bar{X}(m)\varepsilon} \right\rceil^2 \qquad (1)$$

while N(m)=the required number of simulations runs, $\bar{X}(m)$ = the sample mean from m replications, α = the level of significance (considered 95%), ε = an allowance for error (considered 0.05), m= 10, $t_{9,0.025}$= 2.262. The test showed that N ≥ 16. To ensure solid results, 40 simulation runs were executed.

The average result of the simulation runs was compared to the average result gathered from the real system with a statistical t-test. The null hypothesis is H_0: $\mu_1 - \mu_2 = 0$, which implies that both samples represent the same system and the alternative hypothesis H_1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ which implies that there is a significant difference between the real system and the simulation. The level of confidence is 95% which means that the parameter α = 0.05. If the P-value ≤ α then the difference between the means is statistically significant (Reject H_0). If P-value > α then the difference between the means is not statistically significant (accept H_0). As table 1 shows, according to the P-value of the t-test, the null hypothesis is acceptable. Thus, we can conclude that the simulation model is valid and represents the real system of this CSD.

		Mon	Tue	Wed	Thu	Fri
Container	Real	65	66	66	82	68
	Simulation	68	69	59	82	68
	T-test p-value	0.68	0.53	0.63	0.54	0.51
Basin	Real	43	50	40	46	42
	Simulation	44	50	39	46	41
	T-test p-value	0.7	0.56	0.54	0.59	0.61
Individual	Real	241	345	337	250	341
	Simulation	219	332	328	243	328
	T-test p-value	0.55	0.6	0.57	0.58	0.56
Tray	Real	170	186	204	179	208
	Simulation	169	180	200	175	205
	T-test p-value	0.6	0.58	0.64	0.52	0.57

Table 1: Comparing the results of the real system, simulation and t-test P-value

5 INTRODUCING AN AGV

As mentioned, the proposed solution for improving productivity in a CSD is using AGV robots to transfer and load racks into the washer, which is a step toward adaptation of industry 4.0 in hospitals. Automated transfer seems to be beneficial not only for saving time but also for ensuring staff safety. An additional advantage is that the robot can unload and transfer the racks as soon as they are out of the washer while staff must wait for them to cool down. This CSD plans to add two robots in the system, one in the decontamination section and one in the sterilization section. Robots are designed and made by STERIS, a leading provider of infection prevention and other procedural products and services. The product is named ATLAS WAV automation (figure 5). In the decontamination section, the robot will fetch the empty racks, transfer the full racks and load the washer. In the sterilization section, it will unload the racks from washers, transfer the racks to the packing area and return the empty racks to the return point. Applying AGVs in healthcare and other systems can be analysed from technical, economical and humanistic aspects. This study focuses on technical aspects.



Figure 5. ATLAS STERIS automation robot

The objective of testing this scenario in a simulation is to compare the performance of both systems to measure the impact of adding the new technology. Three performance indicators were considered to analyze the performance :

a) turnaround: in the literature, this phrase is used for the time interval from the instrument's arrival in the decontamination section until it is ready to be delivered (Lin *et al.*, 2008);
b) queue time: refers to the time that an instrument or a group of instruments wait before a person or machine is available; and,
c) work in process (WIP): implies the number of instruments that stay in the system at night, to be treated the following day.

Reducing these factors would be considered as an improvement and increase the service level. The results of these indicators are presented in the next section in comparison with the tested scenarios.

6 RESULTS AND DISCUSSION

The turnaround results comparing the manual (as-is) situation with the robot are illustrated in figure 6.

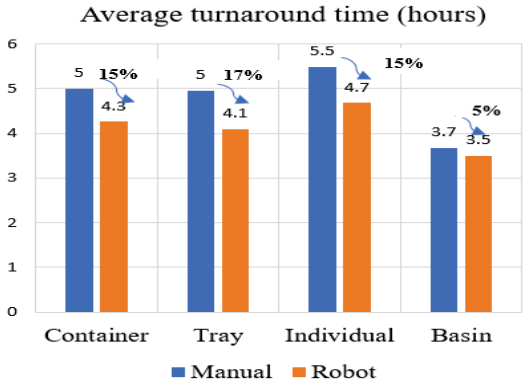


Figure 6. Turnaround in manual and AGV scenarios

If we look at the first indicator, results show a 15% reduction in turnaround time for containers and individuals and a 17% improvement for trays. For basins, there is a slight improvement of 5%. As the basins are not unique and crucial instruments and their turnaround is already shorter than other instruments, the reduced impact does not seem to pose a problem.

When looking at the second performance indicator, it can be observed that adding robots may have a significant impact on the system (figure 7). The most interesting change is 58% decrease in the pre-disinfection queue which is because of the high number of transfers done by the robot which frees the decontamination staff. On the other hand, the queue time of the washing machines increases. The reason is that more instruments are treated which makes buffers of racks ready to go to the washer. The queue time of drying and packing shows a decrease of 32% and 37%. The queue for peel packing of individuals does not show any change.

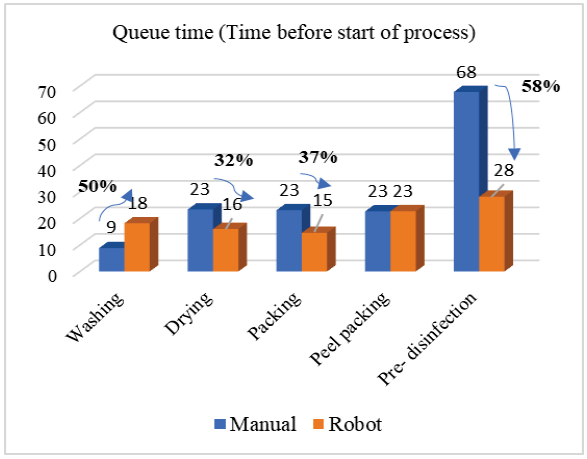


Figure 7. Queue time in manual and AGV scenarios

Let's recall that the third indicator, WIP, is the number of instruments staying in the system at night. It is calculated by the following equation.

WIP per day= Number of arrivals of the day + WIP of the day before – number of exits on the day (2)

As there are some days where the workload is lighter, the WIP from one day to another may also vary. Figure 8 shows the WIP per day for each instrument.

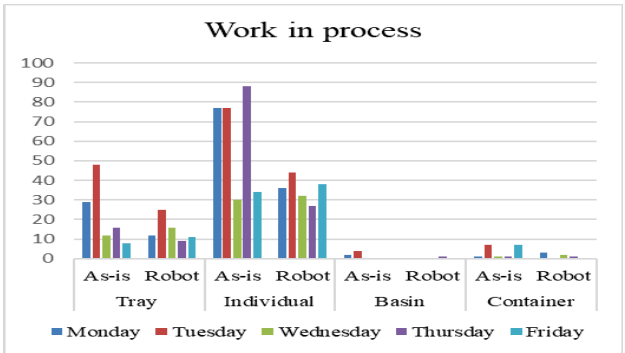


Figure 8. WIP in manual and AGV scenarios

As the figure suggests, the WIP number for trays and individuals is higher compared to basins and containers. The reason is that the later arrivals of instruments are from the clinic and emergency which do not usually use containers and basins (i.e., they are used in operating rooms). Using the robot makes a significant reduction in the number of WIP which is promising, not only because it is linked with the reduction of turnaround, but also because contaminated instruments should not stay with-

out treatment for a long period of time. The results show improvements in all three performance factors without creating a bottleneck in another area of work. The results of the AGV scenario to automate the internal transfers of a CSD will help hospital managers decide if it is worth the investment. The results of the simulation model provide the effects on performance indicators. However, some human factors such as the long-term ergonomic benefits and satisfaction of staff are also important. An interesting element to look at when introducing robots in a CSD is the number of washloads and loading time per equipment per day. The average number of washloads is 329 times per week. This number implies that CSD staff manipulate full racks 658 (329*2) times in a week, including 329 transfers and 329 loading/ unloading operations. There are also transfers for returning and fetching the empty racks. Table 2 shows the number and distance of transfers which can be saved per week by using the robots for transfers.

	Item	Distance (meter)	Loaded transfer (number)	Loaded transfer (km)	Unloaded transfer (number)	Unloaded transfer (km)
Decontamination	Basin /container	14 m	132	1.8 km	396	5.5 km
	Tray	9 m	197	1.8 km	591	5.3 km
	Total		329	3.6 km	987	10.8km
Sterilization	Basin /container	10 m	132	1.3 km	396	3.9 km
	Tray	2 m	197	394 m	591	1.2 km
	Total		329	1.7 km	987	5.1 km

Table 2. Distances saved by using the robots per week

This result confirms the ergonomic benefits for staff besides the time saved. Moreover, the potential increase in capacity for the center by using AGVs, and less use of human resources, in situations such as the Covid-19 pandemic, could be considered in the final decision. Finally, this project is a primary step in using artificial intelligence in CSDs and the connection of objects and instruments which could lead to more accurate and safer work in this pivotal process. Although the results are promising, there are some limitations in this study. Primarily, the possible unexpected events such as machine failure or missing staff were not considered, secondly, since the introduction of new technologies in work habits comes with its challenges, other aspects such as learning curve or reluctance to change were not analyzed. Another limit is that this research does not cover the economic analysis of investment return for hospitals by using the presented AGV. Although this aspect would be interesting for further study, hospitals might invest in this technology for the ergonomic and safety benefits in long-term instead of short term return of investment.

7 CONCLUSION

This study presents a detailed simulation model to analyze the effects of using automated transportation in a CSD. Based on turnaround, queue time and WIP measures, results showed a significant reduction in all indicators, except the queue time for washers. The main contribution of this research is to provide a simulation model for automation in a CDS and using AGVs in this system. An additional contribution for the CDS is a tool that can be used to analyze the performance of their system and test various scenarios. Contribution for the industry is that the provided model could be modified and used as a decision-making tool by providing the effects of using AGV robots in the system, the number of robots that would be needed and the potential benefits expected for the customers.

There are many potential expansions of this work, such as testing staff scheduling or changing arrival rates to analyze the impact of these changes on the system. Providing a combination of optimization and simulation is another promising future work. Finally applying the modified version of the model to make a generic model is considered as future work for this study.

REFERENCES

Angelopouloua, A., K. Mykoniatisb, and N. R. Boyapati, 2020. Industry 4.0: The use of simulation for human reliability assessment**.** Procedia Manufacturing**,** 42 (2020) 296–301

Bonnefoy, J.C., 2015. Transformation du fonctionnement du bloc opératoire par l'approche du chariot de cas. Mémoire de maitrise, École de technologie supérieure université du québec.

Centeno, M.A., R., Giachetti, R. Linn, and A.M Ismail, 2003. A simulation-ILP based tool for scheduling ER staff. *Winter Simulation Conference*, New Orleans, USA, p.1930-1938

Ethier, F., 2003. Simulation du circuit de stérilisation d'un bloc opératoire. Mémoire de maitrise, HEC Montréal.

Gunal, M. M., and M. Pidd, 2010. Discrete event simulation for performance modelling in health care: a review of the literature. *Journal of Simulation*, 4(1), 42–51.

Kelton, W.D., R.P. Sadowski, N.B. Zupick, 2015. *McGraw-Hill Education*, 2 Penn Plaza, New York, NY 10121

Mascolo, M.D. and A. Gouin, 2013. A generic simulation model to assess the performance of sterilization services in health establishments. *Health Care Management Science* (2013) 16:45–61

Molino, M., C.G. Cortese, and C. Ghislieri, 2020. The Promotion of Technology Acceptance and Work Engagement in Industry 4.0: From Personal Resources to Information and Training. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(7).

Ngameni, H., 2014. Approvisionnement du bloc opératoire par chariot de cas au CHU sainte-justine, Mémoire de maitrise, Polytechnique Montréal.

MODELISATION DE CONTROLEURS DISCRETS POUR L'INDUSTRIE 4.0

Armand TOGUYENI

Centrale Lille Institut, CRIStAL, UMR 9189 F-59650 Villeneuve-d'Ascq, France
Univ. Lille Nord de France, F-59650, Lille, France
armand.toguyeni@centralelille.fr

RESUME : *Ce papier présente une étude relative au développement de systèmes de production intelligents dans le contexte de l'industrie manufacturière. Nous montrons que de tels systèmes doivent être agile, c'est-à-dire capable de s'adapter rapidement à des contextes changeant comme une production particulière ou une panne. Dans cette étude nous modélisons le système de commande de ces systèmes par une approche en couches et générique. Nous distinguons plusieurs classes de modèles permettant de gérer chacun différentes catégories de flexibilité. L'objectif essentiel de l'étude est de fournir une méthode rigoureuse et systématique permettant de modéliser et de vérifier de manière efficace ce type de système.*

MOTS-CLES : *Modélisation des systèmes, Industrie 4.0, Ingénierie des systèmes, Systèmes à Evènements Discrets, Réseaux de Petri, contrôleur.*

1 INTRODUCTION

L'Industrie 4.0 est un concept clé dans le développement actuel des systèmes de production (Mittal et *al*., 2019 ; Qu et *al.*, 2019). L'idée de ce concept est la construction de systèmes industriels (production et logistique) qui peuvent adapter leur production en fonction de leur environnement (demandes du marché, défaillances de machines ...). Cette étude concerne la conception de systèmes de production discrets et intelligents. L'agilité de ce type de système dépend de son degré de flexibilité et de ses capacités de reconfiguration (Radziwon et al. 2014).
L'objectif de cette étude est donc la conception du contrôle de tels systèmes afin de profiter des flexibilités matérielles offertes par le système pour adapter en permanence sa production. Pour cela, nous avons choisi de les modéliser par les Colored Petri Nets (CPN) qui offrent la possibilité d'identifier les produits tout en ayant un fort potentiel de concision (Jensen and Kristensen, 2015).
L'objectif de ce travail est de fournir une méthode d'ingénierie systématique pour assurer la conception rigoureuse de modèles de contrôle. Il s'agit d'un complément et d'une amélioration des travaux présentés dans (Toguyeni 2006). Il propose une modélisation plus concise des Gammes Opératoires Etendues (GOE), réduisant ainsi considérablement la combinatoire des modèles en phase de conception. Il propose également la modélisation discrète des allocateurs de ressources, permettant une vérification discrète du modèle global.

Cet article est structuré comme suit. La deuxième partie concerne la problématique et le contexte de l'étude. Dans la troisième partie, nous présenterons notre méthode de modélisation. Dans la quatrième partie nous proposons un modèle générique des GOE. Dans la cinquième partie, nous présentons un modèle d'allocateur de machines permettant de mettre en œuvre à la fois les fonctions de pré-allocation (Toguyeni, 2006) et d'allocation d'une machine. Nous terminerons cette étude par une conclusion et les perspectives de ce travail.

2 PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE DE L'ETUDE

Les systèmes de production actuels doivent être agiles afin de pouvoir produire des produits personnalisés en faibles quantités. Cela nécessite de pouvoir fabriquer en temps réel des produits nouveaux et donc d'être facilement reconfigurable. Pour faire face à ces défis, deux concepts clés doivent être pris en compte pour leur conception : la flexibilité et la reconfiguration dynamique (Radziwon et al., 2014).
On distingue plusieurs types de flexibilité : flexibilité du produit, flexibilité de gamme opératoire, flexibilité des fonctions de transformation, flexibilité du transport, flexibilité de la production ... Ces différentes formes de flexibilité vont induire un contrôle plus ou moins complexe. Dans cette étude nous nous intéressons en particulier à la flexibilité de type « open shop ». Du point de vue commande, la problématique majeure d'un open shop est de maitriser l'explosion combinatoire du modèle de comportement. Cette explosion est due au fait que les opérations ne sont pas ordonnées (Toguyeni, 2006). Dans la partie 4, nous proposerons notamment un nouveau modèle de gamme opératoire étendue permettant de traiter ce problème.
La reconfiguration d'un système de production est nécessaire en cas de modification de l'ensemble des ressources du système. Cette modification peut être permanente (cas de l'ajout d'une nouvelle ressource) ou temporaire (cas d'une panne de ressource). Une panne de ressource est un événement imprévu qui doit être traité en ligne, pour gérer les produits qui sont déjà dans le système et pour les produits qui doivent être chargés sur le système. Le concept de reconfiguration a été formalisé il y a quelques années pour définir une nouvelle classe de systèmes de production appelée Système de Production Reconfigurable ou SPR (Koren 2014).

La Figure 1 décrit un système intelligent qui servira de cas d'étude illustratif tout au long de cette étude. Chaque machine met en œuvre différents types d'opérations d'usinage notées "f_i". L'opération "f_3" est ainsi réalisée par toutes les machines. À l'opposé, l'opération "f_4" est uniquement réalisable par la machine M_4. Elle est donc critique au sens qu'elle ne peut pas être remplacée. Les machines de ce système sont desservies par un convoyeur à bande. Sur ce convoyeur sont positionnés des postes de travail (Z_i) permettant aux robots de palettiser ou de dé-palettiser les pièces chargées sur des palettes afin d'être transportées par le convoyeur auprès d'une machine. Les relations d'accessibilité du système de transport sont illustrées sur la Figure 1 par des flèches orientées montrant la direction du mouvement des pièces et des palettes. Pour passer de Z_1 à Z_3, une pièce a deux possibilités : soit être routée par le chemin IS_1-Z_2-IS_2, soit utiliser directement le chemin IS_5. Ces alternatives illustrent la flexibilité du routage. De même, le robot R_4 peut transférer directement une pièce du stock *IN* à Z_2, le poste de chargement de la machine M_1. En fonctionnement normal, à partir d'*IN*, le stock d'entrée, il charge les pièces sur les palettes bloquées sur le poste Z_1. De même, il peut décharger des pièces finies vers le stock de sortie *PiOUT*. Les IS_i (i ∈{1,2,3,4,5,6}) sont des zones de stockage temporaire du convoyeur. Cette étude suppose que la capacité de chaque Z_i est d'une palette et que la capacité des zones IS_i est de 5 palettes.

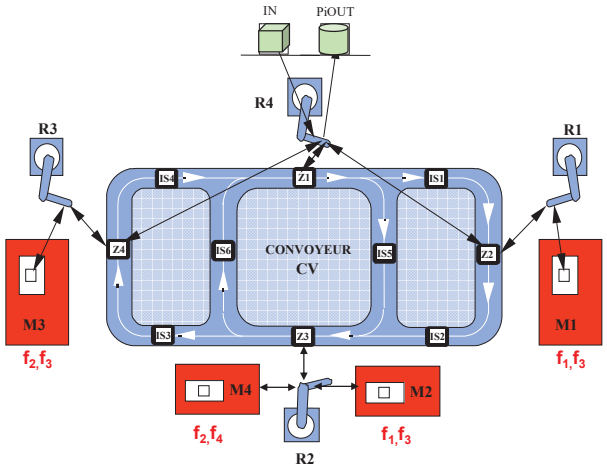


Figure 1 : Exemple de système de production intelligent

3 METHODE DE CONCEPTION DE LA COMMANDE

3.1 Présentation synthétique du processus de conception

Notre processus de conception est basé sur un découplage entre les contraintes des spécifications du produit et les contraintes des spécifications des ressources. Par conséquent, il comprend deux flux de conception : un flux centré sur le produit et un flux centré sur les ressources (Toguyeni 2006).

Cette étude se concentre sur la construction des modèles finaux construits par le flux de produits. Étant donné la distribution de ces modèles sur des ordinateurs séparés communiquant par le biais de réseaux informatiques industriels et de messagerie industrielle, on utilise une approche client/serveur pour prendre en compte la contrainte d'asynchronisme induite par cet environnement (voir (Toguyeni 2006)). Dans nos modèles, cela se traduira par l'utilisation de paires de places sémaphores (Requête/Acknowlege) permettant de synchroniser des processus Réseaux de Petri (RdP) distribués.
Les principaux modèles finaux sont la Gamme Opératoire Etendue (GOE), le Graphe de Coordination du Système de Transport (GCST) et les allocateurs de ressources. Une GOE modélise les différentes opérations appliquées à un produit afin qu'il passe de son état brut à un état fini. Le GCST permet de gérer les opérations de palettisation et de dépalettisation d'une pièce sur une palette circulant sur un tapis roulant, ainsi que les transferts d'une zone de travail à une autre. Les allocateurs de ressources permettent d'affecter les ressources pour réaliser les opérations de transformation des pièces, en fonction de leur gamme de fabrication respective.

3.2 Principes de base de la modélisation

L'ensemble des modèles construits est basé sur notre technique de routage des pièces dans le système de production. Cette technique est inspirée des datagrammes, une technique de routage des paquets dans les réseaux informatiques. Ainsi chaque pièce est routée dans le système de production en fonction de deux paramètres : sa destination finale et l'état des ressources de transformation et de transport.

La destination finale d'une pièce est définie par les allocateurs de ressources de la fonction pilotage. Pour comprendre le principe, nous considérons la **Figure 2**.

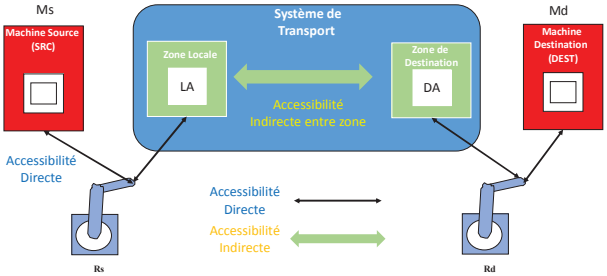


Figure 2 : Schéma générique pour le transport d'une pièce

Le transport d'une pièce d'un lieu source vers un lieu destination est basé sur les relations d'accessibilité (Toguyeni 2006) entre les différentes postes de travail du système de production. Si, nous considérons le système de la Figure 1, Z_2 et M_1 sont en relation d'accessibilité externe car il est nécessaire d'utiliser le robot R_1 pour

transférer des pièces entre ces deux lieux : Z_2 appartient au convoyeur et M_1 représente une machine. À l'inverse, il existe une relation d'accessibilité interne indirecte entre Z_1 et Z_3 car ils appartiennent tous deux au convoyeur (Z_1 et IS_5 d'une part et IS_5 et Z_3 d'autre part sont en relation d'accessibilité directe).
Etant donné une pièce située sur un lieu de départ comme la machine M_s sur la **Figure 2**, la fonction pilotage doit d'abord définir sa destination finale en fonction de la prochaine opération à réaliser du point de vue de sa gamme d'usinage. Compte-tenu de l'état des ressources de transformation, le pilotage va allouer la machine M_d pour réaliser cette opération de transformation. Le GCST de transport sera alors chargé de gérer le transport de la pièce jusqu'à M_d. La route est définie dynamiquement en fonction de l'état des ressources de transport (pannes, saturation des stocks intermédiaires). La présentation de la construction du GCST est en dehors de cette étude. Par la suite nous focalisons sur la construction des allocateurs des ressources de la fonction pilotage et sur la conception d'une GOE générique permettant d'interpréter les gammes de fabrication de chaque pièce dans une approche de type open shop.

3.3 Présentation du formalisme de modélisation

Pour la modélisation de nos contrôleurs discrets, nous avons choisi les Colored Petri Nets (CPN) de Jensen. Dans les CPN, à chaque place doit être affecté un type pour définir la classe d'appartenance des jetons autorisés. On peut associer des expressions, voire des fonctions écrites dans le langage ML. On peut également associer aux transitions, des expressions booléennes appelées « gardes » qui doivent être vraies pour qu'une transition validée soit franchie. D'autre part, le formalisme donne la possibilité de relier différents modèles en fusionnant des places (utilisation de tag de fusion pour simplifier graphiquement la représentation du modèle).

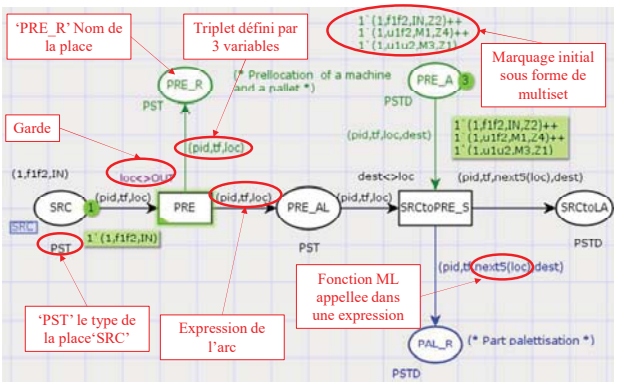


Figure 3 : Synthèse de la syntaxe du Réseau de Petri CPN

La **Figure 3** donne une synthèse de la syntaxe d'un modèle CPN. En raison de la taille limitée de l'article, cette syntaxe et la sémantique sera précisée dans les sections suivantes lors de la présentation des différents modèles.

4 LES GAMMES OPERATOIRES ETENDUES

Une Gamme Opératoire modélise toutes les opérations à appliquer pour transformer une pièce brute en une pièce finie. Elle est étendue afin de prendre en compte ses interactions pour demander au pilotage de lui allouer une machine pour réaliser l'opération de transformation suivante de sa gamme de fabrication, et ensuite, de demander au GCST de coordonner les ressources de transport afin d'acheminer le produit vers cette machine.
Dans (Toguyeni 2006), pour chaque type de pièces caractérisé par une gamme de fabrication distinct, nous définissions un modèle CPN distinct. Compte tenu du nombre d'opérations dans la gamme de fabrication et des flexibilités des machines correspondant aux différentes opérations de transformation, la GOE qui en résultait avait une combinatoire très importante. En effet, pour fabriquer une pièce de type f_1f_3 sur le système de production de la Figure 1, la GOE résultante a 52 places et 29 transitions. En réalité, la gamme de fabrication d'un produit comporte des dizaines d'opérations de traitement et chaque opération peut être effectuée sur des dizaines de machines différentes. Il est donc nécessaire de proposer un nouveau modèle de GOE qui permette de réduire cette combinatoire.

Pour cela nous prenons en compte le schéma générique de transfert donné par la **Figure 2** ainsi que le principe de routage présenté au paragraphe 3.2. Sur la base de ces données, nous précisons par un diagramme de séquence, les opérations à mettre en œuvre du point de vue du GOE (**Figure 4**). Il montre que chaque transfert de pièce nécessite systématiquement 5 opérations :
- Une *pré-allocation* sur le lieu d'origine (M_s) pour définir la destination de la pièce (*DA* pour Destination Area).
-Une *palettisation* de la pièce de la machine source M_s sur la zone de palettisation (appelée ici *LA* pour Local Area), en relation directe d'accessibilité avec la machine source.
- Un *transfert de LA vers DA*. *LA* et *DA* sont a priori en accessibilité indirecte. Afin de ne pas modéliser au niveau de le GOE toutes les possibilités de routage entre deux zones caractéristiques en accessibilité indirecte, on se contente de modéliser le fait que la pièce est en transfert entre *LA* et *DA*. La flexibilité du transfert et donc les combinatoires générées par cette flexibilité sont prises en compte par le modèle CPN du GCST.
- Une demande d'*allocation* de la machine de destination M_d lorsque la pièce palettisée arrive en *DA*.
- Une *dépalettisation* de la pièce en *DA* et son *chargement* sur la machine de destination M_d.
Une fois la pièce arrivée en M_d, la GOE doit lancer le programme de fabrication correspondant à l'usinage demandé. Lorsqu'il est terminé, la situation de la pièce usinée sur M_d est exactement la même que la situation initiale considérée sur la machine M_s. Ainsi, il est évident de considérer que M_d joue maintenant le rôle de la machine M_s précédente et, qu'il est alors possible de recommencer toute la procédure décrite ici.

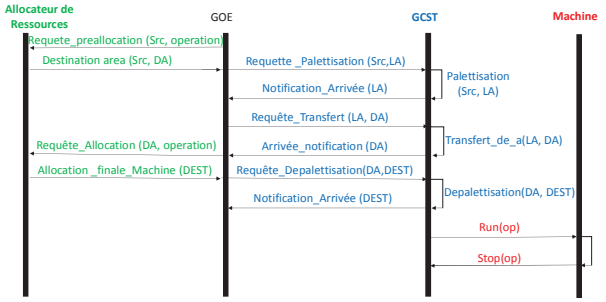


Figure 4 : Diagramme de séquences pour le transfert d'une pièce basé sur le schéma de la Figure 2

Pour être générique, il faut traiter des cas spécifiques tels que le départ de la pièce du stock *IN* et son retour au stock *PiOUT* lorsqu'elle est terminée. En effet, lorsqu'il n'y a plus d'opération de fabrication, il est nécessaire que la fonction de *pré-allocation/allocation* oriente la pièce vers la sortie du système (cas 1). Un autre cas spécifique est celui où la *pré-allocation* désigne la machine actuelle comme celle qui doit effectuer l'opération de fabrication suivante. Cela signifie qu'à ce stade, la *pré-allocation* fonctionne comme une *allocation* et qu'il n'est donc pas nécessaire de transférer la pièce puisqu'elle se trouve au bon endroit (cas 2).

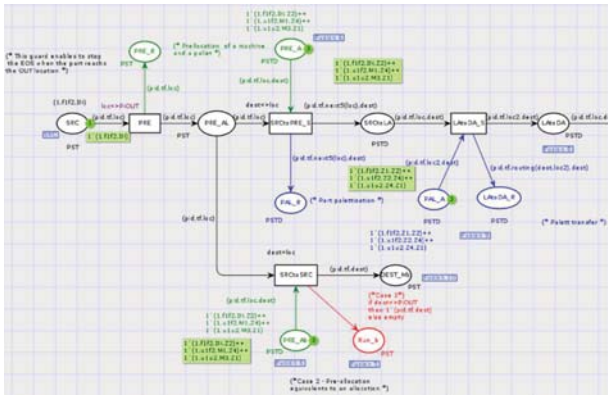


Figure 5 : GOE générique – partie 1

Les figures 5, 6 et 7 montrent le modèle CPN générique d'une GOE. Il est décomposé en 3 figures en raison de sa taille et pour permettre une meilleure lecture. Certaines places sont répétées dans ces figures afin de montrer le lien entre les différentes parties du modèle. Par exemple, la place "*LAtoDA*" (qui signifie un transfert du lieu "*LA*" au lieu "*DA*") est répétée dans les figures 5 et 6. Les places et transitions de couleurs noires sur ces figures modélisent la séquence des états opératoires pour la réalisation d'une opération de transformation. La GOE est conçue comme une fonction qui interprète la gamme de fabrication de chaque pièce qui est modélisée par une liste d'opérations de transformation à réaliser. Les parties vertes représentent les communications asynchrones (interfaces) avec les allocateurs de ressources. Les parties bleues représentent les interfaces avec le GCST. Les parties rouges représentent les interfaces avec les modèles des machines.

Les modèles CPN sont basés sur les structures de données ML suivantes :

```
(* Définition de la localisation d'un produit *)
colset OSA=with
IN|INvZ1|Z1vZ2|Z2vZ3|Z3vZ4|Z1vZ3|Z3vZ1|Z4vZ1|Z1v
OUT|Z2vM1|M1vZ2|Z3vM2|Z3vM4|M2vZ3|M4vZ3|Z4v
M3|M3vZ4|M1|M2|M3|M4|OUT|
IS1|IS2|IS3|IS4|IS5|IS6|Z1|Z2|Z3|Z4;
(* Définition des états de fabrication des produits bruts,
semi-finis et finis *)
colset TRSF=with
f1|u1|f2|u2|f3|u3|f4|u4|f5|u5|f1f2|u1f2|f1u2|u1u2|f3f1f4|u
3f1f4|u3u1f4|u3f1u4|u3u1u4;
(* Définition de l'état d'un produit *)
colset PST=product PID*TRSF*OSA;
(* Définition de l'état d'une pièce et de sa destination
finale*)
colset PSTD=product PID*TRSF*OSA*OSA;
```

Dans un modèle CPN, il est nécessaire d'affecter un type à chaque place du modèle. Ainsi, les places de la GOE sont de deux types : *PST* ou *PSTD*. Le type *PST* définit l'état d'un produit du point de vue d'une opération de transformation (type *TRSF*) et du point de vue sa localisation dans le système de production (type *OSA*). La place "*SRC*" (**Figure 5**) est la première place du modèle. Elle définit chaque produit sous la forme d'un triplé *(produit_identification, gamme_fabrication, localisation)*. Ainsi, le jeton *(1,f1f2,IN)*, spécifie que l'on a une pièce de type f_1f_2 présente sur le stock d'entrée des pièces *IN* et qu'elle a pour identifiant la valeur 1. L'identifiant de chaque pièce est défini par rapport à son type et permet de savoir qu'elle pièce est traitée par rapport à l'en cours du système.

La place *"N_SRC"* (figure 11) représente la fin du GOE conformément au diagramme de séquences de la **Figure 4**. Elle est également de type *PST*. En fait les places "*SRC*" et "N_*SRC*" sont fusionnées par le tag 'src' de couleur bleu dans les figures. Cela permet de dire que ces deux places n'en font en fait qu'une, permettant de donner au modèle de GOE un fonctionnement récursif. En effet, lorsque le jeton arrive dans la place "*N_SRC*", cela signifie que toutes les opérations nécessaires pour réaliser une opération de transformation de la gamme d'usinage ont été exécutées. Par exemple, par rapport au produit qui était modélisé par le jeton *(1,f1f2,IN)* dans "*SRC*", on pourra retrouver un jeton *(1,u1f2,M2)* dans "*N_SRC*". Cela signifie que le produit se trouve sur la machine M2, sur laquelle a été réalisée l'opération de transformation *f1*, conduisant à l'obtention d'un produit semi-fini de type *u1f2*. La fusion des deux places fait que l'on a alors le jeton *(1,u1f2,M2)* dans la place "*SRC*", indiquant que l'on doit à présent recommencer tout le processus du GOE pour réaliser l'opération *f2*.

Il est à noter la garde définie par l'expression "*loc<>PiOUT*" qui est associée à la transition "*PRE*". Cette condition permet de ne pas relancer la GOE pour une pièce qui a été sortie sur le stock de sortie des pièces "*PiOUT*".

Certaines des places d'interfaces du GOE sont de type *PSTD*. Ce type ajoute la localisation de destination (qui est de type *OSA*) au type *PST* précédent. Par exemple, c'est le cas de la place "*PRE_A*" (**Figure 5**) qui est une place d'interface avec l'allocateur de resources. Par exemple, le jeton *(1, f1f2, IN, Z3)*, signifie que la pièce 1 localisée sur le stock IN doit être transportée vers le poste Z3 du convoyeur. C'est une *pré-allocation* qui sera expliquée dans la section suivante. La conséquence c'est que toutes les places d'interfaces avec le GCST (places de couleur bleue sur les figures) sont de type *PSTD*.

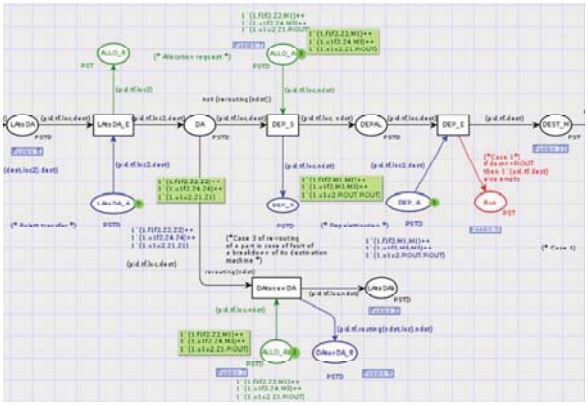


Figure 6 : GOE générique – partie 2

Les place "*PRE_R*", "*PRE_A*" et "*PRE_Ab*" (**Figure 5**) servent à gérer une demande de préallocation. "*PRE_R*" est le sémaphore de requête et "*PRE_A*" est le sémaphore de réponse. La transition "*SRCtoSRC*" modélise la situation d'une *pré-allocation* équivalente à une *allocation* (à noter que les places "*PRE_A*" et "*PRE_Ab*" sont fusionnées par le tag "*fusion 7*"). Cette situation survient quand la machine allouée correspond à la machine même sur laquelle se trouve la pièce (cas 2).

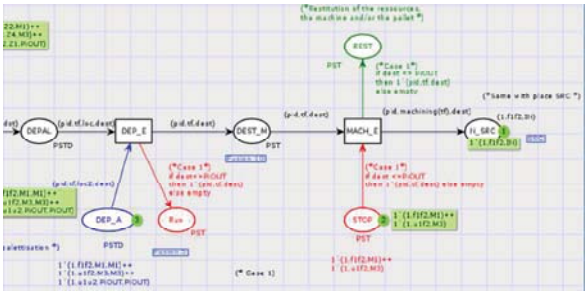


Figure 7 : GOE générique – partie 3

Dans ce cas, le jeton modélisant la pièce va directement de la place "*SRC*" au lieu modélisant sa présence sur la machine de destination. Par conséquent, la place "*DEST_Mb*" (respectivement "*Run_b*") de la **Figure 5** est fusionnée avec la place "*DEST_M*" (respectivement "*Run*") de la **Figure 6** par le tag "*fusion10*" (respectivement "*fusion 5*"). Une construction similaire est effectuée dans la **Figure 6** par la transition "*DAtonewDA*". Elle modélise la réorientation d'une pièce vers une nouvelle destination ("*newDA*") en cas de défaillance de la machine de destination "*Md*" pendant le transfert de "*LA*" à "*DA*".

5 LE PILOTAGE

Dans notre approche, le rôle du pilotage est de résoudre les indéterminismes résiduels de la partie commande. C'est une fonction intelligente qui peut être mise en œuvre de différentes manières et avec différents formalismes. Cette fonction prend notamment en charge l'allocation des ressources, afin d'arbitrer les demandes conflictuelles. Les ressources considérées sont les palettes, les machines, les robots, les aiguillages et les jonctions du convoyeur. En raison de la place limitée, dans cette étude, nous avons choisi de ne présenter que l'allocation des machines. Nous avons choisi ici d'utiliser le formalisme des CPN. Cela permet de vérifier une GOE, en intégrant le pilotage comme faisant partie de son environnement.

Une originalité de ce travail, est de distinguer deux étapes en matière d'allocation d'une machine : la *pré-allocation* et l'*allocation* finale. La *pré-allocation* permet d'augmenter les performances du système de production.

Pour comprendre l'idée, revenons au schéma générique du transport d'un produit donné par la **Figure 2**. Du point de vue du transport, il est nécessaire d'effectuer l'affectation de la machine de destination (M_d) avant le départ de la pièce. Si sa capacité est d'une unité, cela signifie qu'on ne pourrait plus affecter cette machine à d'autres produits. Par conséquence, tous les autres produits qui devraient être usinés en M_d seraient bloqués sur leur localisation courante, au lieu de se rapprocher de M_d en temps masqué. Cela limiterait donc la productivité du système. Pour une opération de transformation donnée, la *pré-allocation* consiste à indiquer le poste de chargement (noté *DA*) de la machine où le produit doit être transformé. Cette *pré-allocation* n'exige donc pas que la machine soit libre. Elle a juste besoin qu'elle ne soit pas défaillante. Ainsi, l'allocation finale est demandée seulement lorsque le produit est arrivé sur *DA*, donc à proximité de la machine M_d. Si la machine de destination choisie par la *pré-allocation* n'est pas défaillante, l'allocation consiste à faire passer son statut de libre (free) a occupé (occupied), puis à indiquer en conséquence à la GOE la destination finale comme correspondant à M_d.

Dans le GOE, la *pré-allocation* est modélisée par la paire de places "*PRE_R*"/"*PRE_A*"

L'allocation d'une machine correspond donc à la définir comme lieu final de destination d'un produit. C'est la raison pour laquelle dans notre modèle de GOE générique présenté à la section précédente, nous avons la paire de places "*ALLO_R*"/"*ALLO_A*" qui modélisent respectivement la demande d'allocation et la réponse donnée par l'allocateur de ressources.

En fait, la pré-allocation et l'allocation fonctionnent très étroitement. Elles dépendent toutes deux de l'état de la machine et de l'emplacement de la pièce au moment où elles sont requises. Pour la pré-allocation, la machine doit être disponible (pas en panne) et la demande doit être faite à un endroit source tel que M_s (**Figure 2**). Pour

l'allocation, la machine doit être libre et opérationnelle et la demande doit est faite sur *DA* le poste de chargement de M_d, la machine allouée. En cas de panne de cette machine (survenu au cours de l'acheminement), la demande d'allocation est implicitement interprétée par le pilotage comme une requête de *pré-allocation*. Il y a alors réacheminement de la pièce vers une autre machine mettant en œuvre la même fonction que celle qui est devenue défectueuse lors du transfert de la pièce vers *Md* (cf. transition "*DAtonewDA*" sur la figure **Figure 6**).
A contrario, en cas de demande de pré-allocation, si la machine pré-allouée est la machine sur laquelle se trouve la pièce, la requête est interprétée par le pilotage comme une demande d'allocation (cf. transition "*SRCtoSRC*" dans la **Figure 5**) Ces deux cas montrent qu'il est nécessaire d'implémenter ensemble la pré-allocation et l'allocation. Par conséquent, c'est le même contrôleur qui met en œuvre les deux fonctions. Le comportement se différencie en fonction de la localisation de la pièce au moment de la demande et en fonction de l'état de la machine.

Pour implémenter le contrôleur d'allocation des machines, définissons les types et variables suivants dans CPN ML.

```
(* Défini le statut d'une machine *)
colset STAT=with free|occupied|faulty ;
colset RES=subset OSA with [M1,M2,M3,M4];
colset RAWOP=subset TRSF with [f1,f2,f3,f4];
(* Défini une liste d'opérations de transformation *)
colset LOP=list RAWOP;
(* Défini  une machine par rapport à son état et sa liste
d'opérations de transformation *)
colset MACH=product RES*STAT*LOP*OSA;
(* Défini le type machine alloué *)
colset ALMAC=product
RES*PID*TRSF*LOP*OSA*OSA;
```

Ainsi le type MACH, permet de spécifier une machine du point de vue de l'allocateur. Par exemple, le jeton *(M2,free,[f1,f3,f1f2],Z3)*, indique que la machine *M2* est libre, et qu'elle peut réaliser des pièces de type *f1*, *f3* ou *f1f2*. La valeur *Z3* indique le lieu dans la système à partir duquel on peut faire une demande d'allocation. Dans tous les autres emplacements, toute demande d'allocation reçue par la place "*ALLO_R*" (demande d'allocation) est considérée comme une demande de pré-allocation. Cette place du modèle de l'allocateur (**Figure 8**) est fusionnée avec la place "*ALLO_R*" de la GOE (**Figure 8**).
Ces types sont utilisés pour définir le type des places du CPN de la **Figure 8**. Ensuite, définissons les variables qui sont utilisées pour écrire les expressions du modèle.

```
(* Identifiants de pièces *) var pid,pid2:PID;
(* Variables de localisation *) var loc, loc2,dest,ndst :
OSA;
(*Variables des opérations d'usinage *) var tf,tf2 :
TRSF;
(* Liste d'operations d'usinage réalisées par une ma-
chine *) var ltf:LOP;
(* Variable statut d'une machine  *) var st:STAT;
(* Variable définissant une machine *) var m:RES;
```

En utilisant ces variables, on peut écrire les expressions des arcs CPN. Par exemple, l'expression de l'arc entre la place *"Standby"* et la transition "*Reqproc*" est *(m,st,ltf,loc)*. Cette expression signifie que la transition "*Reqproc*" est validée s'il y a au moins un jeton de ce type à la place "*Stanby*" et un jeton d'expression *(pid,tf,loc2)* dans la place "*ALLO_R*". La place "*Standby*" est la place par défaut qui modélise l'état d'une machine disponible.

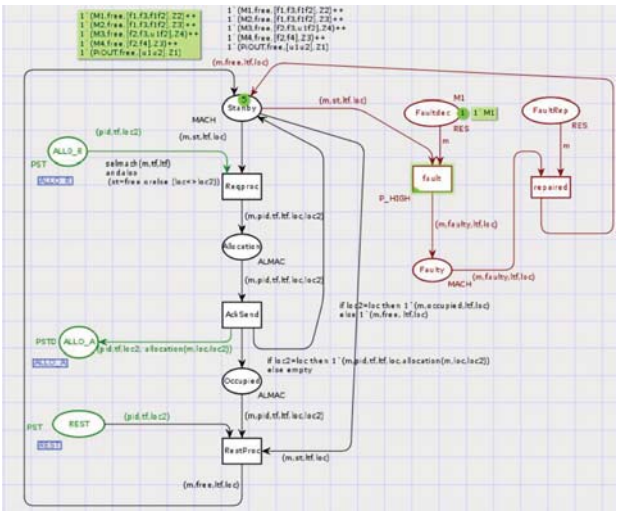


Figure 8 : Allocateur de machines

Pour sélectionner une machine qui peut être allouée, définissons la fonction ML "*selmach*". Sa définition est la suivante :

```
fun selmach(r:RES, ope:TRSF, lope:LOP)=
if lope=nil then false
else if ope=hd lope then true
else selmach(r,ope, tl lope) ;
```

Cette fonction est utilisée dans la garde de la transition "*Reqproc*" afin de vérifier si la machine '*r*' met en œuvre l'opération '*ope*'. Cette opération doit faire partie de la liste des opérations de '*r*'. Cette fonction ML est définie de manière récursive.
De la même manière, définissons en ML, la fonction d'allocation.

```
fun allocation(r:RES,l:OSA,l2:OSA)=
if l2=l then r else l;
```

Cette fonction est utilisée dans l'expression de l'arc entre la transition "*AckSend*" (Acquittement envoyé) et la place "*ALLO_A*". Elle définit la destination d'une pièce. En pratique, bien que nommée *allocation*, elle implémente également la *pré-allocation*. En effet, si '*l2*' le lieu de demande correspond à '*l*', le lieu de chargement de la ressource '*r*', alors la destination est la ressource '*r*', et c'est donc une allocation. Sinon la destination est '*l*', et c'est donc une pré-allocation.

Dans la **Figure 8**, toute la partie du modèle en couleur verte représente l'interface avec la GOE. La partie en violet modélise la gestion des pannes et des réparations des machines. Le reste du modèle de couleur noire représente le processus de *pré-allocation/allocation*. Il convient de noter l'utilisation d'une expression alternative pour les arcs entre la transition "*AckSend*" et les places "*Standby*" et "*Occupied*" respectivement. En cas de *pré-allocation* (cas où *loc2<>loc*), aucun jeton n'est ajouté à la place "*Occupied*" et un jeton de la machine est remis en place "*Attente*" avec la valeur libre ('*free*') pour l'état de la machine. Dans le cas d'une *allocation*, le jeton de la machine est mis à la fois à la place "*Standby*" et à la place "*Occupied*" avec la valeur occupée ('*occupied*') pour son statut. On peut être surpris que le jeton soit remis dans la place "*Standby*". Cela permet à d'autres pièces de pouvoir demander des *pré-allocations* même si la machine est en train de fabriquer une pièce.

La garde de transition '*RestProc*' est définie par l'expression *selmach(m,tf,ltf) andalso (st=free orelse (loc<>loc2))*. Cette expression signifie qu'on fait une préallocation si la position de la pièce (*loc2*) et différente de la position de demande d'allocation de la machine (*loc*). Si la pièce est en *loc*, il faut que la machine choisie soit libre (*st=free*).

Lorsqu'une machine est restituée après évacuation de la pièce déchargée sur *DA* (dans le cas où un jeton est placé dans la place "*REST*"), il est nécessaire de réinitialiser à la valeur "*free*" le champ d'état du jeton de la machine dans la place "*Standby*". C'est pourquoi la transition '*RestProc*' est validée simultanément par les places '*Standby*' et '*Occupied*'. Lorsque cette transition est déclenchée, elle retire les jetons des deux places et remet dans la place "Standby" un jeton dont la valeur du champ d'état a été réinitialisée à la valeur "*free*".

6 CONCLUSION

Cette étude est à la fois un complément et une amélioration des travaux que nous avons proposés dans (Toguyeni 2006). Son objectif principal était de proposer une solution à l'explosion combinatoire des gammes opératoires étendues (GOE). Pour cela nous avons proposé une modélisation récursive de la gamme. La récursivité est obtenue en parcourant la GOE pour chaque opération de la pièce définie dans une liste d'opérations. Cela est possible grâce aux formalismes des CPN qui permettent de manipuler des listes. Quand la liste des opérations a été complètement exploitée la gamme s'arrête avec l'arrivée de la pièce sur le stock de sortie.

Dans cette étude, nous avons également proposé une modélisation des allocateurs des ressources illustrant l'intérêt qu'ils prennent en compte conjointement les fonctions de *pré-allocation* et d'*allocation*. Cela permet d'exploiter au maximum les flexibilités pour la reconfiguration dynamique du système.

Les perspectives de ce travail sont doubles. Dans un premier temps, il s'agit de développer la vérification formelle de telles modèles, soit en exploitant les fonctionnalités des outils de CPN Tools comme la possibilité d'utiliser le model-checker Ask-CTL (Christensen and Mortensen, 1996), soit en proposant des méthodes de vérifications formelles basées sur le calcul d'invariants d'un modèle CPN. Une autre perspective concerne la transcription automatique des modèles CPN dans les langages de la norme IEEC 61131-3 pour la programmation des automates programmables industriels ou des langages de haut niveau. L'exploitation des techniques de l'ingénierie dirigée par les modèles permettrait la transcription automatique dans du code exécutable sur des calculateurs industriels.

REFERENCES

Christensen S. and K. H Mortensen, 1996. Design/CPN ASK-CTL Manual, version 0.9. Available from: http://cpntools.org/wp-content/uploads/2018/01/askctlmanual.pdf [accessed 11 May 2018]

Jensen K. and L. M. Kristensen, 2015. Colored Petri nets: a graphical language for formal modeling and validation of concurrent systems. *Communications of the ACM, 58(6)*, p. 61-70.

Koren Y, 2014. Reconfigurable Manufacturing System. *Preprint of the CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, p. 1035-1039.

Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D. and Wuest, T. (2019). Smart manufacturing: characteristics, technologies and enabling factors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 233(5), p. 1342-1361.

Qu, Y. J., Ming, X. G., Liu, Z. W., Zhang, X. Y. and Hou, Z. T. (2019). Smart manufacturing systems: state of the art and future trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9-12), p. 3751-3768.

Radziwon A., Bilberg A., Bogers M. and E. S. Madsen, 2014. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. *Procedia Engineering, 69*, p. 1184-1190.

Toguyeni A., 2006. Design of modular and hierarchical controllers for reconfigurable manufacturing systems. *Computational Engineering in Systems Applications, IMACS Multiconference on. IEEE*, p. 1004-1011

CONCEPTION D'UN SIAD POUR LA PLANIFICATION MINIERE : MISE EN ŒUVRE DANS LE CONTEXTE MINIER DE L'EXTRACTION DU PHOSPHATE

Najoua ALAOUI [1 2], Ahlam AZZAMOURI [1]

[1] EMINES, Université Mohammed VI Polytechnique
43150 Ben Guérir, Morocco
{Najoua.Alaoui, Ahlam.Azzamouri}@emines.um6p.ma

Selwa ELFIRDOUSSI [1], Pierre FENIES[1 2]

[2] PANTHEON-ASSAS, Université Paris II
75006 Paris, France
{Selwa.Elfirdoussi, Pierre.Fenies}@emines.um6p.ma

RESUME : *La planification à moyen terme de l'extraction d'une mine de phosphate, composée d'une superposition de couches de minerais de caractéristiques différentes (Qualités Sources, QS), consiste à définir les cases à extraire et à affecter les machines d'extraction aux opérations élémentaires au cours du temps. Un modèle de simulation développé et encapsulé dans un Système Interactif d'Aide à la Décision (SIAD), traite ce problème de planification. Cependant, cette simulation du processus d'extraction permet seulement de construire très rapidement un ensemble de programmes techniquement cohérents mais elle ne prend pas en compte la contrainte de la demande en Qualité Marchande (QM), obtenue par un mélange des QS extraites, sur les différents horizons de planification. Cet article propose un SIAD basé sur une approche séquentielle originale permettant de sélectionner un ensemble réduit de scénarios à proposer au planificateur à partir d'un ensemble de scénarios générés. Une étude de faisabilité consiste à vérifier qu'un scénario puisse satisfaire la demande en QM sur les horizons retenus. Ensuite un filtrage multicritères examine les scénarios faisables en termes d'efficacité et d'efficience, pour n'en retenir que deux ou trois scénarios performants à soumettre au planificateur.*

MOTS-CLES : *Aide à la décision, mine, planification, simulation des systèmes, scénarios alternatifs, étude de faisabilité.*

1 INTRODUCTION

La demande mondiale en ressources minérales connait une forte croissance depuis plusieurs décennies qui crée un environnement très compétitif entre les industriels d'un même secteur minier. C'est dans ce contexte que les industriels en concurrence cherchent à améliorer leur efficacité et leur efficience pour pouvoir garder et améliorer leurs parts de marché. Pour faire face à ces enjeux, l'industrie minière se trouve obligée de chercher des outils d'aide à la décision permettant de répondre rapidement aux différentes attentes des clients et être compétitif dans le marché. Ainsi, la question qui se pose c'est : *comment la recherche peut proposer un outil permettant d'aider les responsables miniers à la prise de décision en proposant des scénarios d'extraction simulés respectant les contraintes techniques du gisement et permettant de répondre à la demande client en termes de quantité et de qualité mais aussi en guidant les responsables dans le choix du meilleur scénario à adopter sur le terrain en termes d'efficacité et d'efficience ?*

Notre terrain d'étude est basé sur une mine à ciel ouvert de phosphate du groupe OCP dont la *supply chain* est composée de plusieurs entités permettant de passer du minerai vers un produit fini ou semi-fini. Le caractère sédimentaire de la mine fait que l'extraction d'une couche ne peut être effectué que si le niveau supérieur est déjà enlevé. À partir d'une vision transversale, la mine est divisée en des *panneaux* dont chacun est devisé en des *cases* (la plus petite partie géographique dans la mine dont les caractéristiques chimiques et géologiques varient d'un endroit à un autre) de dimensions 40m x 100m (Azzamouri *et al.,* 2018), (Azzamouri, 2018). Les cases qui se situent sur la même ligne représentent la *tranchée*. Selon une vue longitudinale, la case est composée d'une alternance de couches phosphatées (qualités sources, *QS*) et de couches non phosphatées appelées *stérile*. Le processus d'extraction minier est composé de plusieurs opérations élémentaires interdépendantes (foration, sautage, décapage, gerbage, chargement) consistant à décaper la couche du stérile pour pouvoir accéder aux QS. Un parc matériel assez lourd et varié (en termes de rendement et de possibilité d'affectation aux niveaux phosphatés) est mobilisé pour l'exécution de ces opérations. On en distingue des machines dédiées à des opérations élémentaires particulières et d'autres polyvalentes (plusieurs opérations élémentaires). Les QS extraites sont transportées vers les unités de traitement mécanique en aval pour entrer par la suite dans un processus de mélange ou de blending (Azzamouri et Giard, 2018), (Azzamouri *et al.,* 2019) pour constituer les qualités marchandes (*QM*). Ces dernières sont demandées par le client interne (lavage et chimie) ou externe (export) et définies en termes de quantité et de qualité (caractéristiques chimiques exigées par le client pour chaque QM).

Il est important de noter qu'il existe une différence de temporalité entre les deux maillons de la chaîne (l'extraction en amont et le blending en aval). En effet, nous pouvons qualifier le processus d'extraction de flux poussé

parce qu'il se base sur un programme d'extraction établi sur un horizon de plusieurs mois, lequel conduit parfois à extraire une QS dont on n'a pas besoin pour accéder à une QS inférieure désirée (planification à court et moyen terme) et la partie avale de flux tiré parce qu'elle se base sur la demande de QM à quelques semaines. C'est ainsi que les disponibilités datées de QS liées aux contraintes géologiques et au processus d'extraction, la multiplicité des blends possibles, la difficulté de prise en compte de la temporalité des demandes de QM à satisfaire et des QS disponibles font que l'extraction ne peut pas être pilotée par la demande exprimée en aval. Pour cette raison, nous avons développé un modèle de simulation (l'approche basée sur de l'optimisation est écartée vue sa résolution inexploitable) (Azzamouri *et al.,* 2018), (Azzamouri, 2018) permettant de reproduire en détails le processus extractif avec la granularité décrite précédemment tout en relaxant la contrainte liée à la prise en compte de la demande en QM.

Le programme d'extraction (PE) obtenu par le modèle de simulation respecte toutes les contraintes productives existantes et par la suite est soumis à un test de faisabilité à travers le modèle de blending pour vérifier si cela permettra de satisfaire la demande en QM sur les différents horizons. Cette approche permet d'éliminer les PE n'assurant pas une satisfaction de la demande tout au long de l'horizon de planification annuel et ainsi éviter le choix d'un PE cohérent techniquement et faisable sur le court terme mais pénalisant sur le moyen terme. Autrement dit, un PE pouvant répondre à la demande sur les trois premiers mois mais ne parvenant pas à satisfaire la demande dans les mois qui suivent. Cependant, trouver le meilleur PE reste une tâche difficile parce qu'il n'existe pas d'indicateur unique ou synthétique permettant de choisir le bon programme parmi l'ensemble des programmes faisables. Ainsi, le monde de la mine est un terrain managérial et organisationnel bien particulier caractérisé par une forte variabilité et une interdépendance dans le temps et dans l'espace chose qui rend difficile la planification du processus d'extraction. Pour traiter ce problème complexe, nous présentons à travers cet article la conception d'un système d'aide à la décision pour la planification minière basé sur une approche séquentielle encapsulant le modèle de simulation et permettant de passer de plusieurs programmes d'extraction techniquement cohérents à deux ou trois qui soient les meilleurs sur plusieurs dimensions.

La suite de cet article sera organisée comme suit : en section 2, nous allons présenter une revue de la littérature portant sur les SIAD orientés planification et portant sur des problématiques basées sur la comparaison entre plusieurs scénarios alternatifs. Ensuite, nous exposerons l'architecture du système d'aide à la décision pour la planification minière en détaillant ses différents composants en section 3. En section 4, nous illustrerons la mise en œuvre du SIAD conçu sur le terrain de la mine d'extraction du phosphate de Ben Guérir avant de conclure et de présenter les perspectives de ce travail en section 5.

2 REVUE DE LA LITTERATURE

(Keen et Scott Morton, 1978) définissent le SIAD comme : « l'application de technologies informatiques disponibles et adaptées pour aider à améliorer l'efficacité de la prise de décision managériale dans les tâches semi-structurées ». L'évolution des technologies de l'information a conduit à une augmentation considérable du potentiel des SIAD (Shim *et al*., 2002), (Eom *et al*., 2006), (Bhargava *et al.*, 2007) sans en modifier les fondements. (Power, 2003) explore les développements du système d'aide à la décision (SAD) en commençant par la construction du SAD orienté modèle à la fin des années 1960, les développements théoriques dans les années 1970 et la mise en œuvre des systèmes de planification financière et de SAD basés sur des tableurs au début et au milieu des années 80. Enfin, il termine avec le SAD axé sur les connaissances et sa mise en œuvre sur le Web à partir du milieu des années 1990. Fondamentalement un SIAD se compose : *i)* d'une interface de formalisation d'un problème complexe semi-structuré permettant de définir un problème structuré ; *ii)* d'un ou plusieurs modules de résolution du problème structuré, s'appuyant l'optimisation ou la simulation; *iii)* d'une interface de traitement des solutions possibles permettant de les ajuster et/ou de valider l'une d'entre elles ; *iv)* si aucune de ces solutions n'est acceptable, les informations trouvées sont utilisées pour redéfinir un nouveau problème structuré.

2.1 SIAD orientés planification

La plupart des SIAD de la planification sont basés sur un modèle d'optimisation (Keskinocak *et al.*, 2002), (Freed *et al.*, 2007), (Galasso *et al*., 2009) (Krishnaiyer et Chen, 2015), (Ardjmand *et al.*, 2016). Ainsi, il s'avère intéressant d'analyser de manière plus approfondie, les SIAD de planification basée sur un modèle de simulation. GeSIM est un système de planification basé sur la simulation, proposé par (Heilala *et al*., 2010) pour planifier la fabrication des produits dans une approche impliquant le client. La démarche suivie est basée sur: *i)* intégration des données, *ii)* alimentation du modèle de simulation, *iii)* présentation des résultats et *iv)* prise en charge de modifications interactives. (Fanti *et al.*, 2014) présentent à leur tour un SIAD basé sur la simulation visant à améliorer les décisions tactiques et opérationnelles de la gestion logistique. Il aide à gérer le transport de marchandises entre un port et une zone de stockage à sec d'une manière plus efficace en gérant en temps réel les systèmes de transport afin de réduire les délais dans les ports et la zone de stockage à sec. (Fanti *et al*., 2015) proposent également un SIAD intégrant dans le problème précédant les transactions commerciales. (Comi et Rosati, 2015) proposent un SIAD permettant de comprendre et de simuler la structure d'un système urbain de transport de marchandises et de calculer des indicateurs du niveau de service à comparer à des valeurs-cibles ou de benchmark.

2.2 SIAD avec comparaison des scénarios alternatifs

L'architecture du SIAD proposé dans ce papier ne suit pas le schéma classique décrit au début de la revue de littérature. Il se base sur une approche séquentielle permettant de sélectionner un ensemble réduit de scénarios à proposer au planificateur à partir d'un ensemble de scénarios générés. Il a fallu donc, approfondir encore plus notre état d'art pour étudier les travaux proposant un composant de comparaison et/ou de filtrage des scénarios alternatifs. (Chan *et al.,* 2000) proposent une approche intégrée pour la conception automatique de FMS qui utilise des techniques de simulation et de prise de décision multicritères. Le processus de conception consiste à construire et à tester des conceptions alternatives à l'aide de méthodes de simulation. La sélection de la conception la plus appropriée (basée sur la technique de prise de décision multicritères, le processus de hiérarchie analytique) est utilisée pour analyser les résultats des modèles de simulation FMS. Des outils intelligents sont développés pour soutenir le processus de conception du FMS. La technique Active X est utilisée pour l'intégration réelle du processus de conception automatique FMS et du processus d'aide à la décision intelligent. (D.Brown *et al*., 2009, 2010) proposent d'abord de comparer les scénarios en se basant sur la technique de l'empreinte écologique (EF), qui par la suite leurs semblent insuffisante pour évaluer et analyser le caractère multidimensionnel des scénarios. Ils s'orientent alors vers une autre approche utilisant une version modifiée de l'analyse multicritères des décisions (MCDA) basée sur le NAIADE (Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments). Dans leurs processus décisionnels, les auteurs utilisent un mélange de critères d'évaluation qualitative et quantitative, en offrant un classement des scénarios à la fin.

(Liu *et al.*, 2013) proposent un système intégré d'aide à la décision destiné à faciliter le processus de prise de décision des directeurs manufacturiers en les guidant pour aboutir à des décisions combinant efficacité et efficience globale. Cet outil est composé de quatre composants-clés: un modeleur de contexte global (GCM), un modeleur de notation multicritères (MCSM), un configurateur et un coordinateur. Le choix de la bonne décision à adopter parmi l'ensemble des alternatives proposés par le GCM représente un problème décisionnel difficile. Selon les auteurs aucune mesure de performance unique ne peut représenter suffisamment la complexité du problème, c'est pour cela qu'ils décident de traiter le problème comme un problème de décision multicritère et proposent donc le composant MCSM basé sur l'agrégation de cinq critères: coût, qualité, fiabilité, flexibilité et réactivité. Le décideur attribue un poids à chaque critère décrivant ainsi son importance relative et le MCSM calcule la satisfaction globale pour chaque alternative décisionnelle en fonction du poids agrégé de tous les critères de décision, puis les ordonne du plus satisfaisant au moins satisfaisant, permettant ainsi aux décideurs de choisir facilement une des meilleures décisions alternatives.

(Makarouni *et al.,* 2013) développent une approche d'analyse décisionnelle interactive pour traiter un problème de programmation d'entiers bi-critères à grande échelle, en résolvant un problème de planification de chaîne d'assemblage dans le monde réel d'une entreprise de fabrication. L'article est basé sur une mise en œuvre interactive de la méthode de la contrainte-ε qui génère et évalue un grand nombre de solutions non dominées constituant un échantillon représentatif des gammes de critères. Afin d'évaluer des scénarios alternatifs concernant l'énergie de chauffage résidentielle et la consommation d'électricité domestique dans une région irlandaise.(Marinakis *et al.*, 2016) ont élaboré dans leurs SIAD un Framework qui répond à ce problème décisionnel. Ce Framework se devise en deux niveaux fondamentaux, le premier intègre le développement des scénarios alternatifs, utilisant un processus basé sur les connaissances, une approche participative et un niveau d'aspiration qui permet de garder que les scénarios faisables vis-à-vis la valeur cible de réduction d'émission en CO_2. Le deuxième porte sur une aide à la décision multicritère utilisant l'application d'une approche de régression ordinale multicritères et une méthode d'analyse de classement extrême pour estimer le meilleur et le pire classement des scénarios.

D'autres auteurs comme (Yan Hou *et al.*, 2017) ont privilégié la méthode Pareto dont l'avantage réside dans la possibilité de prendre en compte séparément plusieurs critères conflictuels dans l'évaluation et la sélection des meilleurs scénarios. Le travail de (Pablo C.Gordano *et al* ., 2020) porte sur la concentration de lipides microbiens, matière première pour la production de biodiesel, la première étape a été modélisée par la méthodologie de surface de réponse, puis par l'application de la méthodologie d'optimisation de Pareto basée sur un algorithme génétique (POF-GA). Dans leur étude six facteurs ont été pris en compte pour déterminer les solutions du front Pareto, deux catégoriques (agitation (S) et type source d'azote (NS)) et quatre numériques (temps de culture (TC), rapport carbone / azote (C / N), concentration (M) et pH).

À la lumière des articles analysés, nous avons constaté que même si de nombreux SIAD ont été conçue pour traiter des problèmes de planification, peu d'entre eux sont basés sur la simulation et encore moins traitant la planification de l'extraction minière en particulier. Ce SIAD est donc original du point de vue du secteur d'application et représente un enrichissement pour la catégorie des SIAD de planification basé sur la simulation. Encore plus, son architecture séquentielle le distingue de la plupart des SIAD conçus suivant une architecture classique. Il est aussi intéressant de noter que les critères retenus pour comparer les scénarios alternatifs sont différents d'un problème à un autre.

En effet, comparer les scénarios alternatifs par le biais d'un indicateur synthétique combinant plusieurs sous critères comme c'est le cas pour la plupart des travaux reposant sur des méthodes multicritères d'agrégation, s'avère difficile pour notre cas. La nature des critères étant conflictuelles et la nature du scénario étant multidimensionnelle, aucun critère synthétique ne permet d'explorer la complexité du scénario sans le réduire ou négliger certains aspects. Ceci, rend le choix des critères pertinents difficile mais essentiel pour la bonne prise de décision. Les critères

retenus ne pouvant pas être génériques mais propre au problème décisionnel abordé, peuvent être considérer une originalité en elle-même.

3 SYSTEME D'AIDE A LA DECISION POUR LA PLANIFICATION MINIERE: CONCEPTION

3.1 Objectif et structure

Pour répondre au problème de la planification tactique de l'extraction minière, un système Interactif d'Aide à la Décision (SIAD) basé sur les approches DSS (Keen et Scott Morton, 1978) a été conçu (Alaoui *et al.,* 2019a). le processus du SIAD expliqué par (Alaoui *et al.,* 2019b) permet de piloter la construction des scénarios d'extraction (PE) et faciliter l'interprétation dans le temps et dans l'espace de chaque scénario mais aussi de comparer les scénarios. Ce SIAD s'appuie sur un modèle de simulation, piloté par des paramètres, permettant de générer des scénarios alternatifs. Le planificateur peut à partir d'une variation de ces paramètres, obtenir plusieurs scénarios distincts qu'il pourra analyser par le biais d'un outil de visualisation spatio-temporel pour pouvoir en choisir le meilleur. L'outil est doté de composants interactifs et automatiques facilitant ainsi l'adoption d'un scénario par le planificateur. En effet, notre SIAD propose une interface de définition du problème permettant de gérer les paramètres de pilotage à savoir : les indices de priorité des couches à extraire et l'horizon de planification, ainsi le planificateur s'appuie sur cette interface pour réajuster ces paramètres et relancer la simulation afin de pouvoir régénérer et analyser le nouveau scénario. Notant que les indices varient de 1 à 10 pour plusieurs couches, ce qui permet au planificateur d'obtenir une multitude de scénarios cohérent sur l'horizon défini. En effet, le modèle de simulation ne peut pas prendre en compte la contrainte liée à la demande des QM, les scénarios générés ne peuvent pas être adoptés vu qu'ils ne garantissent pas nécessairement une réponse à la demande en QM sur différents horizons de planification. De plus, même si un scénario est faisable, choisir le plus pertinent peut être une tâche difficile, suite à la diversité de l'ensemble des scénarios faisables. De ce fait, il a fallu élargir les fonctionnalités du SIAD proposé afin de pouvoir tenir en compte ses contraintes pour la maîtrise de la planification de l'extraction minière et ainsi proposé des composants permettant en première phase de tester la faisabilité des scénarios et en deuxième de les filtrer selon des critères particuliers.

3.2 Architecture du SIAD

Compte tenu de la complexité spatiotemporelle des contraintes minières ainsi que la variété des scénarios que nous pouvons générer, l'adoption d'une architecture classique du SIAD s'est avérée inadéquate. C'est ainsi que nous proposons l'architecture du SIAD développé dans la figure 1 illustrant son concept de fonctionnement. Une structure permettant une interaction fluide entre les différents composants fonctionnels du SIAD, basée sur une approche séquentielle originale permettant de sélectionner de deux à trois scénarios à proposer au planificateur.

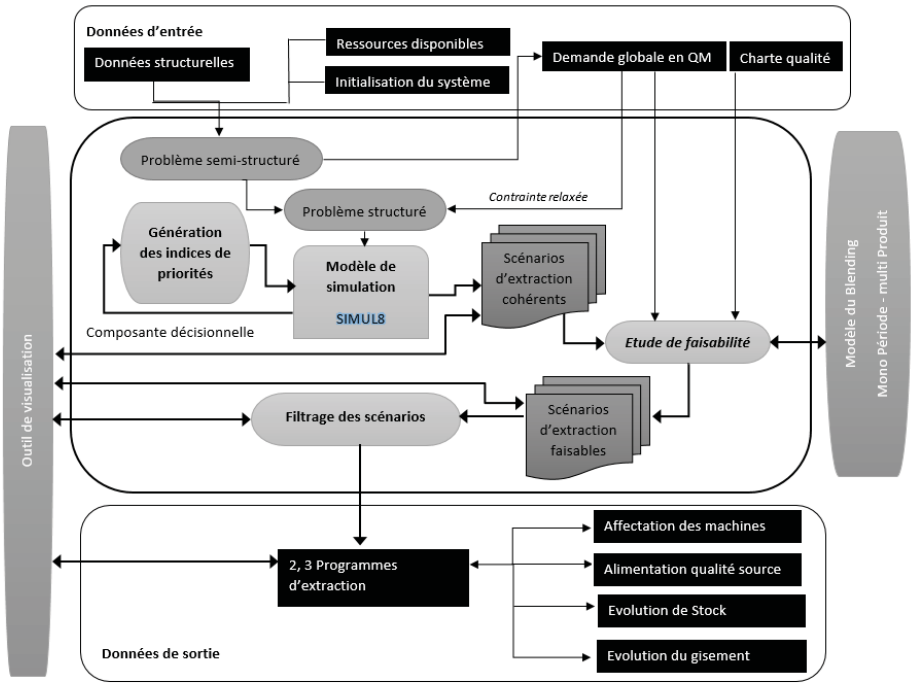


Figure 1: Architecture du SIAD

Les données d'entrée structurelles et dynamiques formalisent un problème semi-structuré qui permet de définir un problème structuré en relaxant la contrainte de prise en-compte de la demande en QM. Le problème structuré sera

par la suite introduit dans le modèle de simulation qui assure une reproduction fidèle du fonctionnement du processus d'extraction et propose ainsi des scénarios variés.
Pour commencer, la génération d'un scénario est basée sur des paramètres de pilotage, principalement, des indices de priorité pour les qualités sources (QS) qui varient de 1 à 10 ce qui rend le nombre de combinaisons possibles très grand. De ce fait, le premier composant à intégrer dans le SIAD est de proposer un générateur automatique de ces indices permettant ainsi l'obtention rapide d'un ensemble de PE différents et cohérents. En s'appuyant sur un vecteur de couple (couche ; indice), le modèle construit un programme de planification techniquement cohérent en respectant les contraintes liées à la nature du gisement, la succession des opérations élémentaires et la polyvalence/spécialisation des machines comme expliqué dans (Alaoui *et al.,* 2019b). La simulation est déterministe, pour chaque couple (couche ; indice) nous obtenons un output unique. En effet, l'output de la simulation est construit à partir des affectations des machines aux différentes cases à extraire tout au long de l'horizon de planification simulé. L'output en forme numérique est ensuite traduit en plusieurs formes graphiques dans le volet de visualisation du SIAD, afin de représenter séparément le Gantt des affectations des machines d'extraction, les courbes d'alimentation évolutive des couches à extraire ainsi que l'évolution concrète de l'extraction sur le gisement via la visualisation 3D.

Cependant la cohérence technique d'un programme de planification n'est pas suffisante. Par ailleurs, il est possible de générer plusieurs PE en variant les paramètres de pilotages sans qu'ils soient nécessairement pertinents. En effet, l'étude de faisabilité s'avère une étape cruciale qui nous permet de définir si le programme en question répond à la demande en QM sur différents horizons de planification. Ce test de faisabilité est effectué à travers différentes instances de blending, définies sur plusieurs horizons de planification, avec les mêmes contraintes de composition et utilisant la formulation classique du blending par la programmation linéaire décrite par (Azzamouri et Giard, 2018). Il s'agira de vérifier s'il est possible de satisfaire la demande cumulée de QM sur n mois, avec la production cumulée des QS sur ces n mois.
Cette étude est donc pertinente dans la mesure où elle constitue un premier filtre qui élimine les programmes ne pouvant pas assurer une satisfaction de la demande en QM sur les différents horizons de planification. Par la suite, le SIAD sera doté d'un composant de filtrage permettant d'automatiser l'élimination des scénarios, en se basant sur des approches de comparaison, et de proposer ainsi au planificateur un nombre de scénarios réduits et pertinents. Ces derniers seront visualisés et analysés via des outils spatio-temporels pour en choisir le scénario à adopter. À tout moment, le planificateur pourra afficher le scénario en s'appuyant sur un outil interactif de visualisation. Ceci consiste à exploiter les résultats numériques du scénario de la simulation sous des formes compréhensibles par les exploitants miniers. Par exemple, des courbes d'alimentation en volumes extraits cumulées par couche, un Gantt d'affectation des machines au cours de l'horizon de planification choisi, précisant les cases à extraire, l'opération élémentaire en cours et la machine effectuant cette opération, etc. l'outil offre aussi la possibilité de comparer deux scénarios contrastés en termes de choix des cases à extraire, des volumes extraits par couches, des affectations des machines d'extraction et du temps de déplacement global des machines, particulièrement les machines dites critiques. Dans ce qui suit, nous allons présenter une étude de cas réelle, illustrant le principe de vérification de la cohérence d'un PE vis-à-vis la satisfaction de la demande par le biais du composant de l'étude de faisabilité intégré dans l'architecture du SIAD (Figure 1).

4 MISE EN OEUVRE DU SIAD DANS LE CONTEXTE DE LA MINE DE BENGUERIR

Le groupe OCP est considéré l'un des plus grands producteurs mondiaux de phosphate et de produits à base de phosphate. Son activité regroupe différentes opérations allons de l'extraction, le traitement, le transport jusqu'à la vente du phosphate. Les sites miniers représentent les entités où l'extraction des couches phosphatées du gisement est effectuée. Parmi les sites d'extraction du groupe, nous trouvons le site minier de Ben Guérir qui représente le contexte de mise en œuvre de ce SIAD. En effet, la conception de ce SIAD constitue une réponse globale et complémentaire aux divers besoins identifiés en collaboration avec l'équipe planification de la mine de Ben Guérir. Les besoins auxquels répond le SIAD sont articulés comme suit : *i*) la modélisation du processus d'extraction et la génération rapide de scénarios alternatifs représentant des PE cohérents techniquement, assurées par le modèle de simulation à évènements discrets (SED) ; *ii*) la vérification de la cohérence des PE générés, en passant par une étude de faisabilité ; *iii)* l'aide à la décision concernant le choix des meilleurs PE parmi plusieurs acceptables, en se basant sur le filtrage des scénarios ; *iv*) la possibilité de visualiser et analyser les scénarios ainsi que *v*) la gestion des données structurelles du gisement.

4.1 Données d'entrée de génération du scénario

Afin de tester la pertinence du SIAD conçu et en collaborant avec l'équipe planification et méthode de la mine, nous avons effectué des tests sur des données réelles afin de générer un PE acceptable assurant la cohérence technique et permettant la satisfaction de la demande annuelle de 2020. Pour cette expérience, nous avons pris en compte l'avancement de l'exploitation sur le chantier, les volumes en stocks ainsi que la disponibilité des machines d'extraction pour définir l'état initial du système. Ceci nous a permis d'alimenter la simulation avec des inputs concrets et précis. Il est aussi important de noter que le gisement étudié contient sept panneaux avec trois cent-vingt-une tranchées, onze-mille-cinquante cases pour l'extraction et cinquante machines pouvant être affectées à l'exécution des sept opérations élémentaires de l'extraction. La génération d'un scénario passe par la définition des indices de priorités des couches ainsi que l'horizon de planification,

comme expliqué dans Alaoui *et al.* (2019a). Cette première étude à porter sur la génération rapide d'une vingtaine de scénarios cohérents dont les indices de priorités différents et l'horizon de planification est annuel. La faisabilité de chaque scénario a été ensuite étudiée pour conserver une base de scénarios faisables pour l'étape du filtrage. Nous retenons à titre d'illustration, le jeu de données de l'un des scénarios répondant à la demande en QM sur les différents horizons de planification, de l'année en cours. Le PE étudié repose sur les indices de priorités (IP) par couche (Cs) décrits dans le Tableau 1.

Tableau 1: Indices de priorités retenus

Cs	SB	SA2	C0	C1	C2S	C3S	C3I	C4S	C4I	C5S	C5I	C6
IP	6	10	1	9	7	4	3	4	6	1	1	8

4.2 Etude de faisabilité

Pour vérifier si le PE étudié répond ou non à la demande en QM, nous avons effectué une étude de faisabilité basée sur six instances de blending, définies sur les horizons de planification suivants : 1, 2, 3, 6, 9 et 12 mois. La demande décrite dans le tableau 2, représente les quantités prévisionnelles à satisfaire en 2020, de chaque QM. Le mélange des QS retenu pour produire les QM sur chaque horizon doit nécessairement respecter la charte qualité décrite dans le tableau 3. Cette charte, définit les intervalles à respecter pour chaque composant chimique (CC: BPL, CO_2, MgO, SiO_2, Cd) afin de répondre aux exigences des clients. D'un autre côté, le tableau 4 synthétise les alimentations en QS proposées par le PE étudié.

Tableau 2: Demande des QM en tonne de l'année 2020

Demande	Tess	Stand	BG 10	MT	AD
1 mois	92335	64165	8333	16667	833
3 mois	277005	192495	25000	50000	2500
6 mois	554010	384990	50000	100000	5000
12 mois	1108020	769980	100000	200000	10000

Tableau 3: Charte qualité des QM

Bornes	CC/ QM	STAND	TESS	AD	MT	BG 10
Max	BPL (%)	65,12	65,12	67	65	65,12
	CO_2 (%)	6,5	6,5	7	7	6,5
	MgO (%)	0,75	0,75	1	1	0,75
	SiO_2 (%)	9,9	9,9	8	8	9,9
	Cd (ppm)	8	6,5	12	12	8
Min	BPL (%)	59,24	60,9	64	64	58,78
	CO_2 (%)	5	5	5	5	5
	MgO (%)	0	0	0	0	0
	SiO_2 (%)	5,5	5,5	0	0	5,5
	Cd (ppm)	0	0	0	0	0

Tableau 4: Quantités mensuelles cumulées des QS en tonne

Mois/Cs	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**	**M6**
Sillon B	0	0	214697	252755	322198	444461
Sillon A2	0	6342	6342	59742	59742	59742
C 0	55553	88087	88087	268526	331777	331777
C 1	0	0	0	0	3955	3955
C 2S	0	5619	35673	133627	229234	229234
C 3S	0	84013	100218	155074	192545	192545
C 3I	0	84013	215168	391948	444955	492050
C 4S	0	15703	15703	15703	20484	37658
C 4I	0	61523	61523	61523	66303	74581
C 5S	0	30534	30534	30534	30534	30534
C 5I	0	133052	133052	133052	133052	133052
C 6	0	0	0	0	0	0
Mois/Cs	**M7**	**M8**	**M9**	**M10**	**M11**	**M12**
Sillon B	454879	475536	475536	475536	475536	475536
Sillon A2	59742	86115	86115	86115	103734	253044
C 0	335732	357608	372653	387698	387698	387698
C 1	3955	3955	151142	199207	203865	203865
C 2S	251253	290802	303473	303473	316219	316219
C 3S	210079	221116	227458	227458	227458	255142
C 3I	505431	575218	609005	609005	609005	685882
C 4S	59263	71940	71940	71940	71940	71940
C 4I	138670	182644	182644	182644	182644	182644
C 5S	99774	171947	171947	171947	171947	171947
C 5I	334876	606786	606786	606786	606786	606786
C 6	0	122903	330031	342592	342592	342592

En passant par une formulation du blending classique mono-période multi-produits et à partir des données décrites ci-dessus et des volumes de QS initialement disponibles en stock, nous testons s'il existe, pour chaque QM demandé, un blend permettant de répondre à la demande exprimée sur l'horizon choisi tout en respectant la charte qualité des QM ; pour une même QM, le mélange utilisé de QS varie avec l'horizon retenu, en raison de disponibilités différentes et d'une structure de la demande de QM variant dans le temps. Pour illustrer le résultat de l'étude, nous présentons trois des six instances de blending effectuées sur le PE généré. Dans les tableaux 5,7 et 9, nous décrivons les mélanges de QS proposés pour satisfaire la demande en QM sur les horizons de planification suivant : 1 mois, 3 mois et 6 mois. Ainsi que leurs compositions chimiques décrites dans les tableaux 6, 8 et 10. Nous soulignons aussi que les mélanges proposés pour chaque horizon de planification sont distincts.

Tableau 5: Mélange proposé pour satisfaire la demande du 1er mois (tonne)

Cs/QM	STAND	TESS	AD	MT	BG 10
Sillon B	10000	0	0	0	0
Sillon A2	10000	0	0	0	0
C 0	0	28662	500	10000	3171
C 1	10000	0	0	0	0
C 0_1	0	10000	0	0	0
C 2S	10000	0	0	0	0
C 3S	3944	6056	0	0	0
C 3I	3000	0	333	6667	0
C 3	5391	4609	0	0	0
C 4S	10000	0	0	0	0
C 4I	0	8171	0	0	1829
C 4	10000	0	0	0	0
C 5S	10000	0	0	0	0
C 5I	0	0	0	0	0
C 5	0	6667	0	0	3333
C 6	10000	0	0	0	0
Total	92335	64165	833	16667	8333

Tableau 6: Caractéristiques chimiques du mélange

CC/QM	STAND	TESS	AD	MT	BG 10
BPL	64,36	61,19	64,00	64,00	58,78
CO_2	5,46	5,38	5,09	5,09	5,86
MgO	0,73	0,68	0,70	0,70	0,68
S_iO_2	7,48	7,02	6,74	6,74	7,13
Cd	7,03	6,50	5,48	5,48	8,00

Tableau 7: Mélange proposé pour satisfaire la demande du 3éme mois (tonne)

Cs/QM	STAND	TESS	AD	MT	BG 10
Sillon B	38922	0	0	0	0
Sillon A2	0	0	0	0	0
C 0	0	57073	1500	30000	9514
C 1	10000	0	0	0	0
C 0_1	10000	0	0	0	0
C 2S	0	0	0	0	0
C 3S	110218	0	0	0	0
C 3I	78746	125422	1000	20000	0
C 3	0	10000	0	0	0
C 4S	0	0	0	0	0
C 4I	9119	0	0	0	5486
C 4	10000	0	0	0	0
C 5S	0	0	0	0	0
C 5I	0	0	0	0	0
C 5	0	0	0	0	10000
C 6	10000	0	0	0	0
Total	277005	192495	2500	50000	25000

Tableau 8: Caractéristiques chimiques du mélange

CC/QM	STAND	TESS	AD	MT	BG 10
BPL	65,12	65,08	64,00	64,00	58,78
CO2	5,29	5,08	5,09	5,09	5,86
MgO	0,70	0,71	0,70	0,70	0,68
SiO2	7,87	7,37	6,74	6,74	7,13
Cd	5,20	5,36	5,48	5,48	8,00

Tableau 9: Mélange proposé pour satisfaire la demande du 6éme mois (tonne)

Cs/QM	STAND	TESS	AD	MT	BG 10
Sillon B	0	0	0	0	0
Sillon A2	85790	0	0	0	0
C 0	0	267263	3000	60000	11514
C 1	13955	0	0	0	0
C 0_1	0	0	0	0	0
C 2S	150300	0	0	0	0
C 3S	200039	2506	0	0	0
C 3I	0	0	2000	40000	0
C 3	0	0	0	0	10000
C 4S	0	0	0	0	0
C 4I	0	66095	0	0	18486
C 4	10000	0	0	0	0
C 5S	0	0	0	0	0
C 5I	93926	49126	0	0	0
C 5	0	0	0	0	10000
C 6	0	0	0	0	0
Total	554010	384990	5000	100000	50000

Tableau 10: Caractéristiques chimiques du mélange

CC/QM	STAND	TESS	AD	MT	BG 10
BPL	63,33	61,35	64,00	64,00	58,78
CO_2	5,51	5,27	5,09	5,09	5,69
MgO	0,74	0,71	0,70	0,70	0,73
S_iO_2	7,97	6,49	6,74	6,74	7,37
Cd	6,66	6,50	5,48	5,48	7,80

Nous avons suivi la même logique pour étudier la faisabilité sur 2 mois, 9 mois et 12 mois. Pour le PE étudié les six instances de blending effectuées ont mené à une solution réalisable en forme de proposition d'un mélange satisfaisant les QM demandées sur l'horizon choisi et respectant la charte qualité des clients. Le PE étudié est donc cohérent techniquement et faisable vis-à-vis de la demande en QM sur les différents horizons de planification.

4.3 Visualisation des résultats

La génération d'un PE doit nécessairement passer par la prise de deux décisions tactiques fondamentales à la planification de l'extraction minière : le choix des cases à extraire et l'affectation des machines à utiliser pour effectuer

les opérations d'extraction. Dans le résultat que nous avons généré par le modèle de SED sur un horizon d'un an avec une maille horaire et testé faisable via l'étude de faisabilité, le PE est représenté par un Gantt précisant les affectations des machines d'extraction de différentes opérations élémentaires aux cases à traiter tout au long de l'horizon de planification. La Figure 2 montre un extrait du Gantt d'affectation des machines d'extraction sur les quatre premiers mois de l'année. Chaque couleur définie une opération élémentaire. Nous retenons dans cet affichage que les opérations élémentaires principales, notamment la foration, le décapage et le gerbage. Pour chaque machine d'extraction, nous définissons la ou les cases à traiter ainsi que leur appartenance (tranchée et panneau), le niveau à traiter (stérile ou phosphate), la date de début du traitement et la date de fin du traitement. Le PE est aussi représenté par des prévisions horaires d'alimentation des différentes couches phosphatées (Figure 3) où chaque courbe précise le volume cumulé à extraire d'une couche spécifique par période.

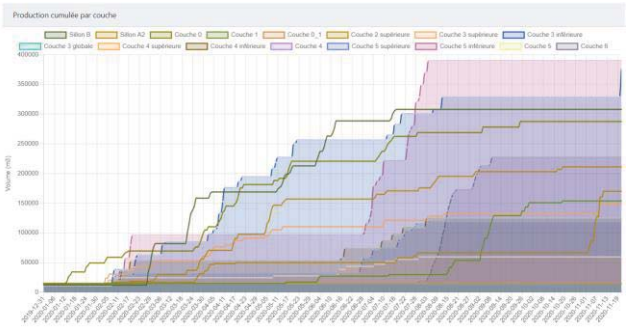


Figure 2: Alimentations en QS sur l'horizon de planification

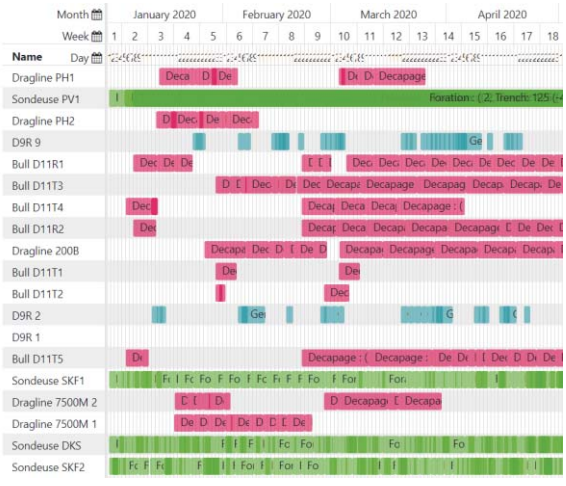


Figure 3: Gantt d'affectation des machines d'extraction

En plus de cette représentation graphique du programme de planification étudié s'ajoute une autre représentation spatio-temporelle (Figure 4). En effet, cette dernière assure une simulation visuelle en 3D et en 2D du scénario proposé comme programme de planification avec un pas de temps variable, qui peut être définit par le planificateur. L'intérêt réside encore une fois dans l'aide à la décision, en offrant une dimension complémentaire permettant la vérification et le suivi de l'évolution proposée par le PE étudié, sur le chantier. Ceci est réalisé via une projection simulée des affectations des machines aux cases choisies pour l'extraction, sur la base du gisement recrée en 3D en puisant dans les données structurelles intégrées dans le SIAD.

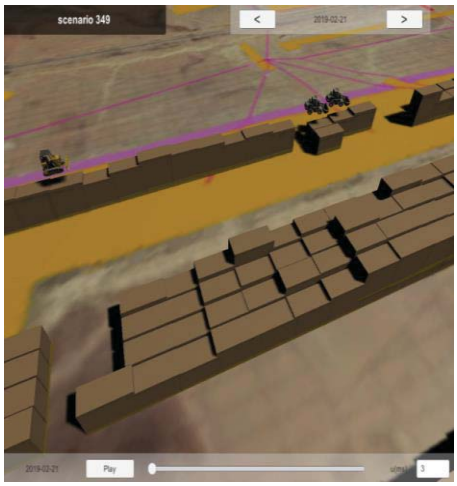


Figure 4: Vue 3D du gisement

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous proposons dans cet article un SIAD pour la planification minière basée sur un modèle de simulation. Suite à la revue de la littérature effectuée, nous avons constaté que l'originalité de ce SIAD réside, en plus de son domaine d'application (mine) et de son approche de résolution (simulation), dans son architecture basée sur une approche séquentielle différente de celle classique connue par (Keen et Scott Morton, 1978). Cette approche séquentielle nous permet de définir le passage d'un ensemble de solutions acceptables vers deux ou trois qui soient les plus performants.

D'un point de vue concret, pour rendre facile la construction de PE alternatifs et aider le planificateur dans son choix du meilleur programme à adopter, le SIAD conçu propose plusieurs composants permettant au planificateur de générer rapidement et correctement différents PE cohérents via un modèle de simulation. Ce dernier, permet de prendre en compte toutes les contraintes productives existantes avec une relaxation de la contrainte liée à la prise en compte des QM. Il est encapsulé dans le SIAD, est alimenté par des données structurelles et dynamiques du gisement ainsi que les valeurs prises par un ensemble de paramètres de pilotage générées automatiquement.

Cependant, parmi les PE produits certains doivent être écartés parce que, à une certaine échéance, la demande globale des QM ne peut pas être satisfaite avec les QS extraites. L'intégration de l'étude de faisabilité nous garantit, dans ce cas, l'élimination de tous les programmes ne

répondant pas à la demande en QM sur les différents horizons de planification et nous permet de conserver l'ensemble des PE faisables. La difficulté à ce stade réside dans la définition de 2 ou 3 programmes performants parmi les PE faisables. Nous illustrons aussi la mise en œuvre de ce SIAD dans le contexte de la mine à ciel ouvert de Ben Guérir en présentant la génération, l'étude de faisabilité ainsi que la visualisation d'un PE portant sur l'année 2020.

Notre vision s'oriente donc vers l'intérêt de l'évaluation de la performance de ces programmes par un dernier composant de filtrage, en cours de développement. Ce dernier, proposera une liste réduite de PE performants et cohérents. Pour ce faire, une analyse approfondie des PE faisables s'avère nécessaire afin de définir les critères significatifs et pertinents qui font qu'un programme est plus pertinent qu'un autre. Une étude des techniques à utiliser pour concevoir ce composant de filtrage s'accompagne a cette analyse. En effet, la revue de littérature concernant les SIAD ayant un composant de comparaison et sélection des scénarios alternatifs nous a permis dans un premier temps de définir et distinguer l'architecture nouvelle du SIAD. Cependant il est fondamental d'approfondir notre revue, afin de pouvoir comparer ultérieurement le composant de filtrage - en court de développement - d'un point de vue méthodologique traitant les techniques utilisées et les critères choisis.

REFERENCES

Alaoui, N., A. Azzamouri, S. Elfirdoussi, P. Fenies, V. Giard, 2019a. Système interactif d'aide à la décision pour la planification de l'extraction minière. *13ème Conférence international de CIGI QUALITA,* Montreal Quebec, Canada.

Alaoui, N., A. Azzamouri, S. Elfirdoussi, P. Fenies, V. Giard, 2019b. Interactive Scheduling Decision Support System for ore extraction at a phosphate mine. *The 8th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management,* Shangai, China.

Ardjmand, E., I. Ghalehkhondabi, G. R. Weckman, and W. A. Young II, 2016. Application of decision support systems in scheduling/planning of manufacturing/service systems: A critical review. *International Journal of Management and Decision Making,* 15(3/4), p. 248.

Azzamouri, A. 2018. *Construction de méthodes et d'outils*

Support framework for supply chain planning with flexible demand, *International Journal of Production Research,* 47 (2), p. 455-478.

Heilala, J., J. Montonen, P. Jarvinen, S. Kivikunnas, M. Maantila, J. Sillanpaa, T. Jokinen, 2010. Developing simulation-based Decision Support Systems for customer-driven manufacturing operation planning, in: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference.*

Keen, P., S. M. Morton, 1978. Decision Support Systems: An Organizational Perspective. *Addison-Wesley Publishing, Reading.*

de planification pour l'industrie minière du phosphate en contexte de Lean Management. Thèse de doctorat, Université Paris Nanterre (France).

Azzamouri, A., M. Bamoumen, H. Hilali, V. Hovelaque, V. Giard, 2019. Flexibilité du blending dynamique avec gammes alternatives et stock de sécurité : mise en œuvre sur une chaîne logistique minière. *13ème Conférence international de CIGI QUALITA,* Montreal Quebec, Canada.

Azzamouri, A., P. Fénies, F. Fontane, V. Giard, 2018. Scheduling of open-pit phosphate mine, *International journal of production research,* 56(23), 7122-7141

Azzamouri, A., V. Giard, 2018. Dynamic blending as a source of flexibility and efficiency in managing a phosphate supply chain, *7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS Conference 2018, July 8-11, Lyon, France*

Bhargava, H. K., D. J. Power, D. Sun, 2007. Progress in Web-based decision support technologies. *Decision Support Systems,* 43(3), 1083-1095.

Chan, F. T., B. Jiang, and N. K. H. Tang, 2000. The development of intelligent decision support tools to aid the design of flexible manufacturing systems. *International journal of production economics, 65*(1), p. 73-84.

David, B., B. O'Regan, R. Moles, 2009. Use of ecological foot printing to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region. *Energy Policy,* 37(6), p. 2205-2213.

David, B., B. O'Regan, R. Moles, 2010. Use of multi-criteria decision analysis to explore alternative domestic energy and electricity policy scenarios in an Irish city-region. *Energy,* (35).

Eom, S., E. Kim, 2006. A Survey of Decision Support System Applications. *Journal of the Operational Research Society*

Fanti, M.P., G. Iacobellis, W. Ukovich, V. Boschian, G. Georgoulas, C. Stylios, 2015. A simulation based Decision Support System for logistics management. *Journal of Computational Science,* 10, p. 86-96.

Freed, T., K.H. Doerr, T. Chang, 2007. In-house development of scheduling decision support systems: case study for scheduling semiconductor device test operations. *International Journal of Production Research*, 45 (21), 5075-5093.

Galasso, F., C. Mercé and B. Grabot, 2009. Decision

Keskinocak, P., F. Wu, R. Goodwin, S. Murthy, R. Akkiraju, S. Kumaran, A. Derebail, 2002. Scheduling Solutions for the Paper Industry. *Operations Research*, 50 (2), p. 249-259.

Krishna, L., G. Janardhan, C. Rao, 2009. Web Integrated Decision Support System for Machine Scheduling and Inventory Management. *Operations Management Journal.*

Krishnaiyer, K., F.F. Chen, 2017. Web-based Visual Decision Support System (WVSIAD) for letter shop. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.*

Liu a, S., R. I. M. Young and L. Ding 2013. An integrated decision support system for global manufacturing co-

ordination in the automotive industry. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 24:4, p. 285-301.

Makarouni, I., J. Psarras, and E. Siskos, 2015. Interactive bicriterion decision support for a large scale industrial scheduling system. *Annals of Operations Research, 227*(1), p. 45-61.

Marinakis, V., H. Doukas, P. Xidonas, C. Zopounidis, 2016. Multicriteria decision support in local energy planning: An evaluation of alternative scenarios for the Sustainable Energy Action Plan. *International journal of management science*.

Pablo, C. G., V. Pereyra , A. J. Beccaria ,S. Vero , H. C. Goicoechea, 2020. Application of pareto-optimal front as an option to desirability function for the optimization of a microbiological process. *Microchemical Journal*.

Power, D.J., 2003. A Brief History of Decision Support Systems. *DSSResources.COM, World Wide Web*, http://DSSResources.COM/history/dsshistory.html, version 2.8, May 31.

Shim, J., M. Warkentin, J. Courtney, D. Power, R. Sharda, and C. Carlsson, 2002. Past, present, and future of decision support technology. *Decision Support Systems,* 33, p. 111-126.

Tang, L., G. Liu, 2007. A mathematical programming model and solution for scheduling production orders in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex. *European Journal of Operational Research*, 182 (2007), p. 1453-1468.

Yan, H., N. Wu, M. Zhou and Z. Li, 2017. Pareto-Optimization for Scheduling of Crude Oil Operations in Refinery via Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics: systems.*

MULTI-OBJECTIVE PROCESS AND PRODUCTION PLANNING INTEGRATION IN RECONFIGURABLE MANUFACTURING ENVIRONMENT: AUGMENTED E-CONSTRAINT BASED APPROACH

Mohammad Amin Yazdani, Lyes Benyoucef

Aix Marseille University, University of Toulon,
CNRS, LIS, Marseille, France
amin.yazdani115@gmail.com
lyes.benyoucef@lis-lab.fr

Amirhossein Khezri, Ali Siadat

Arts et Métiers ParisTech, University of Lorraine,
LCFC, Metz, France
amir_hossein.khezri@ensam.eu
ali.siadat@ensam.eu

ABSTRACT: *Nowadays, manufacturing systems should be cost-effective and environmentally friendly to cope with various challenges in today's competitive markets. Furthermore, being cost-effective needs to optimize the behaviour and functionality of the production system and being environmentally friendly requires to reduce the amount of harmful gasses emitted in the working area. In this context, reconfigurable manufacturing systems (RMSs) have emerged to fulfil these requirements. RMS is one of the latest manufacturing paradigms, where machines components, software or material handling units can be added, removed, modified or interchanged as needed and when imposed by the necessity to react and respond rapidly and cost-effectively to changing. In this paper, a multi-objective multi-product process and production planning problem in a sustainable reconfigurable manufacturing environment is considered. The cost function and three pillars of sustainability functions such as social, environmental, and economical are introduced and optimized. Moreover, an augmented ε-constraint method is proposed to solve the problem. Finally, an illustrative numerical example is presented to show the validity of the approach.*

KEYWORDS: *Sustainability, Process planning, Production planning, Reconfigurable manufacturing systems, Multi-Objective optimization, augmented ε-constraint method*

1 CONTEXT AND MOTIVATIONS

In today's world, a manufacturing system has to be cost-effective and environmentally harmless to acquire sustainability and compete with other rivals in the market. According to a visionary report of Manufacturing Challenges 2020 conducted in USA, this trend will continue, and one of the six grand challenges of this visionary report is "*the ability to reconfigure manufacturing systems rapidly in response to changing needs and opportunities*" (Khezri *et al.*, 2019, 2020). Moreover, due to the escalation in fuel prices, higher tariff for electrical use and environmental legislations, the reduction in energy consumption and carbon footprint has become the need of the hour in the manufacturing sector.

Reconfigurable manufacturing system (RMS) is one of the latest manufacturing paradigms. In this paradigm, machine components, machines software's or material handling units can be added, removed, modified or interchanged as needed and when imposed by the necessity to react and respond rapidly and cost-effectively to changing requirements. RMS is recognized as a convenient manufacturing paradigm for variety productions as well as a flexible enabler for this variety. Hence, it is a logical evolution of the two manufacturing systems already used in the industries respectively dedicated manufacturing lines (DML) and flexible manufacturing systems (FMS). According to (Koren, 2010), DMLs are inexpensive but their capacities are not fully utilized in several situations especially under the pressure of global competition, thus they engender losses. On the other hand, FMSs respond to product changes, but they are not designed for structural changes. Hence, in both systems, a sudden market variation cannot be countered, such as demand fluctuation or regulatory requirements. RMS combines the high flexibility of FMS with the high production rate of DML. It comprises the positive features of both systems, thanks to its adjustable structure and design focus. Thus, in situations where both productivity and system responsiveness to uncertainties or to unpredictable scenarios (e.g., machine failure, market change, …) are of a vital importance, RMS ensures a high level of responsiveness to changes with a high performance. This can be achieved through six main principles respectively *customization*, *convertibility*, *scalability*, *integrability*, *modularity*, and *diagnosability*.

Moreover, (Koren, 2010) suggested that in manufacturing systems, the key to responsiveness in markets as well as cope with market changes caused by fluctuating quantities of demand, is to adjust the production system capacity. He stressed that this adjustment is possible thanks to two types of reconfiguration capabilities in manufacturing systems, which are functionality adjustment and production capacity adjustment. These characteristics are achievable because of reconfigurable machine tool (RMT), which is considered as one of the major components of RMS. Regarding reconfigurable structure designed, RMT provides a customized flexibility and offers a variety of alternatives features.

A sustainable future is the most important concern of human beings in today's world. This ability comprises of happiness, health, education, job satisfaction, and so on. It relies on most aspects of human race life such as social, environmental, and economic. Nowadays, numerous restrictions and laws are set pointing companies to lower the level of damage caused to the environment. Furthermore, they have to consider the health condition of their workers and the effects of harmful materials and remnants of the production on their bodies as well (Massimi *et al.*, 2020). RMS is able to meet these challenges due to its flexibility and integrability. Moreover, it is thought to be one of the most suitable paradigms with the requirements of sustainability.

In this paper, a multi-objective multi-unit multi-part process and production planning problem in a sustainable reconfigurable environment is addressed. Two objectives are minimized respectively the total production cost and the total harmful effects of the dangerous liquids and remnants of the production on the workers' bodies. A mathematical formulation is proposed and solved using an adapted version of the augmented ε-constraint method.

The rest of paper is organized as follows. Section 2 brings up some literature review. Section 3 presents the problem description and its mathematical formulation. Section 4 describes the proposed approach. Section 5 shows the applicability of the approach using a simple numerical example. Section 6 concludes the paper and suggests some future works directions.

2 LITERATURE REVIEW

As one of the newest paradigms, RMS has demonstrated great potential for further researches. In this section, we briefly review some research works in sustainability, process planning and production planning.

2.1 Sustainability in manufacturing systems

The most paramount part of sustainable manufacturing is innovative products to achieve a major part of markets share and implement a sustainable environment at the same time (Khezri *et al*., 2019). It is necessary to shift all the production sites to sustainable product development, which is possible by using reconfigurable manufacturing systems. Besides, RMS has several advantages to impact on manufacturing process and performance as permanent changes due to answer different and situational demands of market zones. Other elements such as cost reduction, improved flexibility, and high quality of final products make RMS a suitable choice for the enabling of economic sustainability in allover the systems. Moreover, it is also plausible to implement social and environmental sustainability by the RMS (Koren *et al*., 2018).

Considering economic sustainability, (Garbie, 2013) claimed that cost is most widely use criterion for production environment and the consideration of the final value. In the concept of environmental sustainability, (Aljuneidi and Bulgak, 2016) believed that the implementation of the product and service design on sustainable business development can represent the system sustainability. (Dubey *et al*., 2017) considered the role of authorities on the final RMS sustainability by the management and organizational culture as sustainable indicator. Furthermore, energy consumption that arose from the usage of the machines in the working environment can be the indicator of the sustainable environment (Choi and Xirouchakis, 2015). In the social environment, the fluctuation of the customer's demand and their satisfaction through the changes can represent the sustainability.

2.2 Process planning

One of the essential parts of RMS is process planning. Process planning leads to find the best way of manufacturing according to the shape, properties, surface, and appearance of the final product. Process planning has emerged as an important issue in the manufacturing systems because a part of the massive production can use only one process plan.

(Khezri *et al*., 2020) developed an environmental oriented multi-objective optimization problem in an RMS. Authors considered process plan generation while introducing a sustainability metric value and counting the manufacturing cost and time to obtain optimal process plans.

2.3 Production planning

Production planning links several segments in a manufacturing environment such as operations scheduling, capacity of the output, final product quality, etc. Furthermore, quality control and process planning can play a decisive role in the decision making of the quantitative matters (Jacob *et al*., 2019).

In this context, few research works have considered the implication of multiple production systems to produce a specific amount of the final products. (Liu *et al.*, 2019) presented a mixed integer stochastic programming model for manufacturing systems. They introduced an effective tool for optimizing the production plan rely on the decision maker point of view. (Kaltenbrunner *et al.*, 2019) considered the production planning for a highly automated pallet production. They proposed a heuristic solution approach to solve the cutting stock problem with a constraining open stack problem occurring at the beginning of the production of pallets, the saw and the downstream stacking robots. The objective is to minimize the waste of material and to ensure a continuous production flow at the pallet production site.

From the above literature review, we can conclude that the combination of process and production planning in a sustainable environment is an interesting and new topic

in the RMS. Moreover, some new approaches, like the augmented ε-constraint method, can solve the problem more precisely.

3 PROBLEM DESCRIPTION AND MATHEMATICAL FORMULATION

3.1 Problem description

In this paper, multi-unit products are considered to be produced by several reconfigurable machines. Each product requires a set of operations linked by a precedence graph (see Figure 1). The problem aims to find the optimal process plan of each product. In this section, the mathematical formulation of the problem is presented, where two objective functions are minimized:

i) Total production cost includes the cost of operations, machines changing costs, production costs and product costs in each sequences.
ii) Total sustainability function includes the environmental sustainability and social sustainability.

Some other assumptions are considered:
1- Workers just check the function of the machines during changes and process.
2- The machines wastes are hazardous for the human beings bodies'.
3- Working area is fulfilled by the hazardous gasses that can affect workers bodies'.
4- The demand is deterministic.
5- Production planning tries to consider the optimum amount of production according to the problem.
6- Process planning tries to find the best sequences and machines.

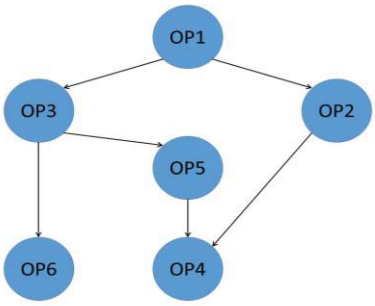


Figure 1: A simple illustrative precedence graph

3.2 Mathematical formulation

In this section, the developed multi-objective mixed-integer linear programming (MINLP) model is presented, where the following notations are used.

Sets	
i , i'	Indices of operations ∈ {1, …, N}
j , j'	Indices of position in the sequences ∈ {1, …, J}
p, p'	Indices of products ∈ {1, …, P}
m ,m'	Indices of machines ∈ {1, …, M}
h , h'	Indices of configurations ∈ {1, …, H}
Parameters	
N	Number of operations
M	Number of machines
J	Number of positions
BM	A big number
w_{So}	Relative weight of social issues
w_{En}	Relative weight of environmental issues
T_h	Cycle time of configuration h
CAP_h	Maximum capacity of the configuration h
$PCAP$	Production capacity
D_p	Market demand of product p in the considered period
H	Number of sequences in the considered period
TP_p	Total production time of product p
AC_{ph}	Assignment cost of product p to sequence h
$CM_{jj'm}$	Cost of changing from position j to position j' by machine number n
$TM_{jj'm}$	Time of changing from position j to position j' by machine number n
PT_{ijp}	Processing time of operation i on the product p at position j
PC_{ijp}	Processing cost of operation i on the product p at position j
PR_i	Set of predecessors of operation
QC_{ph}	Production cost of product p in configuration h
$EL_{i,j}$	Harmful liquid remnants of the operation i at position j
$EG_{i,j}$	Harmful gases emission of the operation i at position j
$l_{i,j}$	Required liquid for operation i at the position j
L	Total available liquid
EF	The effect of harmful gases on the human body during the working hours
Decision variables	
x_{ijh}^p	(x_{ijh}^p = 1) if operation i, of product p is processed at position j, using configuration h (x_{ijh}^p = 0) otherwise
y_{jh}^{mp}	(y_{jh}^{mp}=1) if machine m, is at the position j, to produce product p using configuration h (y_{jh}^{mp} = 0) otherwise
$v_{jj'}^{mp}$	($v_{jj'}^{mp}$ = 1) if there is a change in machine m between the position j and j', to produce product p ($v_{jj'}^{mp}$ = 0) otherwise
q^p	Production quantity of product p
AS_{ph}	Assignment matrix of the product p to sequence h
s_{So}	Sustainability indicator of the social aspect
s_{En}	Sustainability of the environmental aspect
Z_1	Cost function
Z_2	Sustainability function

Objective function (1) details the total cost, where objective function (2) presents the sustainability matters. In this research work, social and environmental aspects are considered as the sustainability matters that can have impacts other than economic factors on the human being lives during production.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}\sum_{h=1}^{H} x_{ijh}^{p} \times PT_{ijp} \times PC_{ijp} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{j'=1}^{J}\sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{P} v_{jj'}^{mp} \times TM_{jj'm} \times CM_{jj'm} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{h=1}^{H} q^{p} \times QC_{ph} + \sum_{p=1}^{P}\sum_{h=1}^{H} AS_{ph} * AC_{ph} \quad (1)$$

$$\text{Min } Z_2 = w_{So}s_{So} + w_{En}s_{En} \quad (2)$$

Subject to the following constraints:

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{p=1}^{P} x_{ijh}^{p} = 1 \qquad \forall j = 1 \dots J,\ \forall h = 1 \dots H \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} x_{ijh}^{p} = 1 \qquad \forall i = 1 \dots I,\ \forall h = 1 \dots H \quad (4)$$

$$\sum_{h} x_{ijh}^{p} \times |PR_i| \leq \sum_{i'}\sum_{j'}^{J-1}\sum_{h'} x_{i'j'h'}^{p} \qquad \forall i = 1 \dots I,\ \forall j = 1 \dots J,\ \forall p = 1 \dots P \quad (5)$$

$$\sum_{h=1}^{H} y_{jh}^{mp} = 1 \qquad \forall j = 1 \dots J,\ \forall m = 1 \dots M,\ \forall p = 1 \dots P \quad (6)$$

$$y_{jh}^{mp} \geq x_{ijh}^{p} \qquad \forall i = 1 \dots I,\ \forall j = 1 \dots J,\ \forall m = 1 \dots M,\ \forall p = 1 \dots P,\ \forall h = 1 \dots H \quad (7)$$

$$\sum_{i}(x_{ijh}^{p} + x_{ij-1h}^{p}) \leq v_{jj'}^{mp} + 1 \qquad \forall j, j' = 2 \dots J,\ \forall m = 1 \dots M,\ \forall p = 1 \dots P,\ \forall h = 1 \dots H \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} x_{ijh}^{p} \times AS_{iph} \times H = q^{p} \qquad \forall p = 1 \dots P,\ \forall h = 1 \dots H \quad (9)$$

$$q^{p} \geq D_p \qquad \forall p = 1 \dots P \quad (10)$$

$$q^{p} \times T_h \leq CAP_h \qquad \forall p = 1 \dots P,\ \forall h = 1 \dots H \quad (11)$$

$$AS_{ph} - AS_{ph'} + (1 - v_{jj'}^{mp}) \times \text{BM} - 1 \geq 0 \qquad \forall j, j' = 1 \dots J,\ \forall m = 1 \dots M,\ \forall p = 1 \dots P,\ \forall h, h' = 1 \dots H \quad (12)$$

$$\sum_{p} q^{p} \times TP_p \leq PCAP \quad (13)$$

$$s_{En} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}\sum_{h=1}^{H} x_{ijh}^{p} \times PT_{ijp} \times (EL_{i,j} + EG_{i,j}) \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P}\sum_{h=1}^{H} x_{ijh}^{p} \times PT_{ijp} \times l_{i,j} \leq L \quad (15)$$

$$s_{So} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{j'=1}^{J}\sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{P} v_{jj'}^{mp} \times EG_{i,j} \times EF \quad (16)$$

$$w_{So} + w_{En} = 1 \quad (17)$$

$$x_{ijh}^{p} \in \{0,1\},\ y_{jh}^{mp} \in \{0,1\},\ v_{jj'}^{mp} \in \{0,1\} \qquad \forall i = 1 \dots I,\ \forall j = 1 \dots J,\ \forall m = 1 \dots M,\ \forall p = 1 \dots P,\ \forall h = 1 \dots H \quad (18)$$

Constraint (3) ensures every operation is done according to process plan. Constraint (4) indicates that each operation is processed once for products in each configuration. Constraint (5) states that each operation is processed if all of the predecessors operations are already finished. Constraint (6) illustrates that each configuration contains machines and products. Constraint (7) ensures that if operation i performed at position p, machine m and configuration c are required. Constraint (8) shows that if there is a change in the machines between the positions or not during the production. Constraint (9) claims that the number of final products is equal to the production sides. Constraints (10) indicates that it is crucial to produce more than the customer demands in order to prevent shortage. Constraint (11) introduces the production capacities. Constraint (12) uses to break the loops in the production site of RMS. Constraint (13) indicates that the amount of production time should not exceed the available time. Constraint (14) illustrates the environmental impacts of the production. Constraint (15) considers the limitation of total required liquid in during the production process. Constraint (16) indicates the social impacts of the production. Constraint (17) is the sum of weights.

4 PROPOSED APPROACH

Several researchers categorized process plan generation as NP-hard problem (Khezri *et al.*, 2020). The proof is simple since process plan generation is aimed to assign suitable machines and configurations to each operation, it can be translated to the well-known travelling salesman problem, which is known as a NP-hard problem. By this translation, operations are taken as nodes and problem is to minimize the objectives given. For the first step, the algorithm calculates the maximum and minimum of each objective function (Mavrotas, 2009). For example, we optimize the kth objective function with consideration of all the constraints. Then, consider the set of achieved solutions for the other functions in the range of each one of them. In this case:

- *i*= 1 contemplates cost objective function
- *i*=2 contemplates sustainability objective function

The using range is as follows:

$$\varepsilon_i = Fn_i^{max} - \frac{r_p}{k} \times i \ \ where\ i = 2 \quad (19)$$

where *i* is total objective functions interval grids and ε_i is considered as the upper bound and by varying the kth objective function, the Pareto solutions can achieved. In this regard, the augmented ε-constraint method is implemented to solve the problem. Figure 2 illustrates the flowchart of the algorithm. The decision maker will choose his preference objective function and the other objective will go under the constraint of the problem. It is contemplate as the initial step.

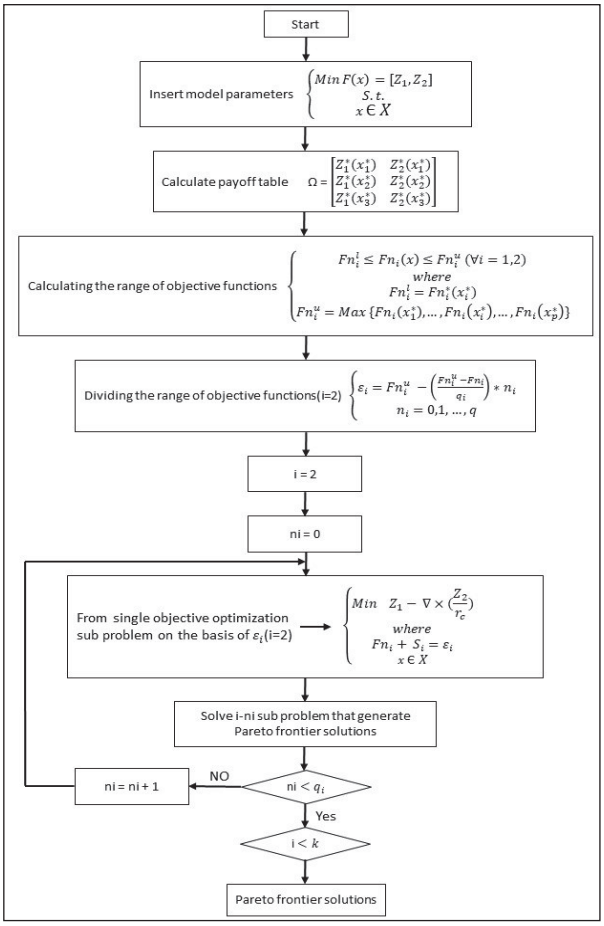


Figure 2: Flowchart of the developed augmented ε-constraint method

5 NUMERICAL EXPERIMENTS AND ANALYZES

In this section, an illustrative example is given and the presented mathematical formulation is implemented in GAMS 30.3.0 and test problems are solved by a laptop computer with Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU 2.60GHz and 12GB RAM.

5.1 Solving a test problem

We have three reconfigurable machines M1, M2 and M3 to produce three different products P1, P2, and P3. The sustainability effects of each one of the sustainability effectors are equal to 0.5, and three different configurations H1, H2 and H3 are available. The best generated process plans achieved by running the algorithm, and the best sequence of each product are shown in Table 1. As an example, product P3 uses machine M3 during Operation Op1 by configuration H3. The most important thing is to avoid irrational changes that increase costs. Furthermore, the pay of table of augmented ε-constraint method is presented in Table 2.

In this test problem, the best amount of cost function is 716.69($) and the amount of harmful effects of liquid and gases is 0.27 sustainability unit (S.u). The less amount of final sustainability function shows lower environmental and social harmful impacts. Hence, we tried to minimize these values as much as possible. Moreover, for the production planning, the optimum amount of the products according to the solved problem is shown in Table 3.

Product 1	Operations	Op1 - Op2 - Op5 - Op3 - Op4 - Op6
	Machines	M1- M1- M1- M2 - M2 - M3
	Configuration	H2 - H3 - H2 - H1 - H1 - H1
Product 2	Operations	Op1 - Op3 - Op2 - Op4 - Op6 - Op5
	Machines	M3 - M2 - M2 - M2 - M1 - M1
	Configuration	H3 - H1 - H1 - H2 - H2 - H2
Product 3	Operations	Op1 - Op3 - Op2 - Op4 - Op5 - Op6
	Machines	M3 - M3 - M2 - M2 - M1 - M1
	Configuration	H3 - H3 - H1 - H1 - H2 - H2

Table 1: Optimum sequence of each product

Z_1($)	Z_2(S. u)
716.69	0.60
841.22	0.27

Table 2. Payoff table of objective functions

Products	q
1	10
2	15
3	15

Table 3. Optimum product quantitates

5.2 Changes of PT

Changes of the processing time, can be predictable on the sustainability function, and the increase of this parameter will increase the final answer of second objective function. But the increases of this parameter have unpredictable impacts on the cost function. Figure 3 shows the changes of this parameter.

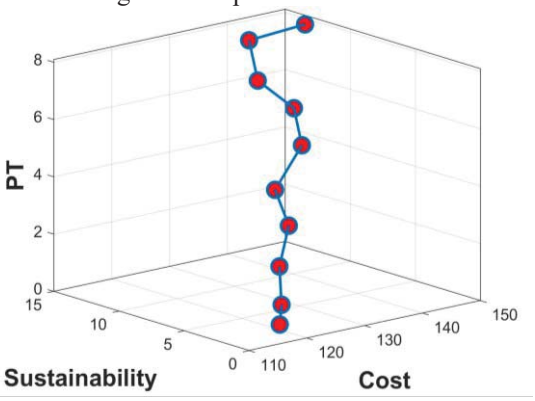


Figure 3. Changes of PT

5.3 Pareto frontier solutions

Figure 4 illustrates the Pareto frontier solutions that consist 22 different points by the running of the algorithm. As we see in the payoff table and in the chart, the best amount of cost function is 716.69($) when the sustainable function is 0.60 (S.u). The best amount of sustainable function is 0.27 (S.u), while the cost function is 841.22($). The Pareto frontier solutions obtained by

running the augmented ε-constraint method and it takes 157.29 seconds.

In most cases, decision makers prefer to maximize their profits; therefore, they try to minimize the cost and consider the best choice for their business. The silver lining is that by choosing the best cost, they will put their workers' health into a risky position, and it is possible to hurt them more than the usual way. Moreover, they have to obey laws that exist for human rights. In the working area, they have to consider an average point that minimum costs and doesn't cross the rolls line that means having proper sustainability objective function. On the other hand, they can't only focus on the best sustainability function. In this problem, the point with 766 ($) and 0.37 (S.u) can be a suitable choice for a decision-maker.

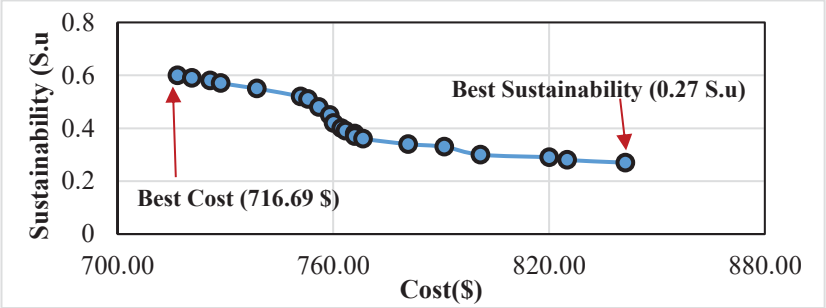


Figure 4. Parto frontier solutions

6 CONCLUSION

For the first time, in this paper, the process and production planning are considered in the RMS concept. Furthermore, to make the problem more realistic, all the sustainability issues, such as social, environmental, and economic are deemed. The problem has been formulated with two objective functions to minimize and solved using an adapted version of the ε-constraint method. For future works, new meta-heuristic algorithms or other heuristic approaches to solve the problem in a large number can be exciting. Furthermore, considering inventory management and maintenance can be useful extensions for the mathematical formulation.

REFERENCES

Aljuneidi, T., & Bulgak, A. A. (2016). A mathematical model for designing reconfigurable cellular hybrid manufacturing-remanufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5-8), 1585-1596.

Choi, Y. C., & Xirouchakis, P. (2015). A holistic production planning approach in a reconfigurable manufacturing system with energy consumption and environmental effects. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(4), 379-394.

Dubey, R., et al. (2017). Explaining the impact of reconfigurable manufacturing systems on environmental performance: The role of top management and organizational culture. *Journal of Cleaner Production*, 141, 56-66.

Garbie, I. H. (2013). DFSME: design for sustainable manufacturing enterprises. *International Journal of Production Research*, 51(2), 479-503.

Jacob, A., Steimer, S., Stricker, N., Häfner, B., & Lanza, G. (2019). Integrating product function design, production technology optimization and process equipment planning on the example of hybrid additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 86, 222-227.

Kaltenbrunner, M., Huka, M. A., & Gronalt, M. (2020). Automating production planning and control in pallet manufacturing–A case study. Procedia Manufacturing, 42, 119-124.

Khezri, A., Benderbal, H. H., & Benyoucef, L. (2020). Towards a sustainable reconfigurable manufacturing system (SRMS): multi-objective based approaches for process plan generation problem. *International Journal of Production Research (Online)*.

Khezri, A., Benderbal, H. H., & Benyoucef, L. (2019). A sustainable reconfigurable manufacturing system designing with focus on environmental hazardous wastes. *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 317-324.

Koren Y. (2010). The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems vol. 80. John Wiley and Sons.

Koren, Y., Gu, X., Badurdeen, F., & Jawahir, I. S. (2018). Sustainable living factories for next generation manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 21, 26-36.

Liu, W., Ma, W., Hu, Y., Jin, M., Li, K., Chang, X., & Yu, X. (2019). Production planning for stochastic manufacturing/remanufacturing system with demand substitution using a hybrid ant colony system algorithm. Journal of Cleaner Production, 213, 999-1010.

Massimi, E., Khezri, A., Benderbal, H. H., & Benyoucef, L. (2020). A heuristic-based non-linear mixed Integer approach for optimizing modularity and integrability in a sustainable reconfigurable manufacturing environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Online)*.

Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455-465.

MODULARITY OF RMS: WHAT ABOUT THE AGGREGATION?

Erica CAPAWA FOTSOH [1,2], Pierre CASTAGNA[2]

[1] IRT Jules Verne (French Institute in Research and Technology in Advanced Manufacturing), 44340 Bouguenais, France (erica.fotsoh@irt-jules-verne.fr, erica.fotsoh@ls2n.fr).
[2] Nantes University, IUT of Nantes, LS2N, BP539 44475 Carquefou Cedex, France
pierre.castagna@univ-nantes.fr

Nasser MEBARKI[2], Pascal BERRUET[3]

[3] Lab-STICC Research Center, University Bretagne-Sud, BP 92116 56321 Lorient, France
nasser.mebarki@univ-nantes.fr
pascal.berruet@univ-ubs.fr

ABSTRACT: *Modularity of Reconfigurable Manufacturing System (RMS) reduces the system complexity, both in design and evaluation of the system. In this paper we proposed a modular view of the system that considers a module regarding four aspects: physical, control logic, KPI and simulation model. The last two one allows an accurate diagnosis of the system in case of disturbances. Each module is evaluated and studied. Yet, the reconfiguration decision is made regarding the system level, thus, modules have to be aggregated. The lack of aggregation methods for simulation model and control logic, and the lack of aggregation functions for KPIs constitute the issue addressed by this paper. The aim of our study is to investigate the aggregation of these aspects of the modules in order to have accurate data at the system level for reconfiguration decision making. A case study in conducted to show how aggregation could be made. Far from proposing rigid models of aggregation, the aim of the paper is to provide opportunities of thinking about the notion of aggregation of simulation models, KPI and control logic within manufacturing context, especially within modular reconfigurable manufacturing system.*

KEYWORDS: *Modularity, Aggregation methods-functions, simulation model, KPI, RMS, reconfiguration decision-making*

1 INTRODUCTION

Reconfigurable manufacturing systems (RMSs) are designed to produce "what is needed just when is needed". (Mehrabi et al., 2000). This is possible because the configuration chosen for the system at a given time matches with the needs that arise. A deep diagnosis of the system is often needed to clearly identify the reconfiguration needs and to determine an appropriate reconfiguration strategy (Capawa Fotsoh et al., 2020). This involves a deep knowledge about the manufacturing system and a good analysis of the system performances through KPI (Maier-Speredelozzi and Hu, 2002).

The diagnosis should reveal the level at which the reconfiguration might be carried: machine level or system level for example (Capawa Fotsoh et al., 2020). Herein an analysis of the performances through KPIs at each level is required. This task is often difficult due to the complexity of the systems. One way to overcome this issue is to use modularity. (Lameche et al., 2017) states that modularity reduces the system complexity and allows the organization of the system in a set of distinct functional component that can be developed and studied independently. That is, the system is broken into number of subsystems each having its KPIs. As KPIs results from the behavior of the system, the analysis of the KPIs at a given time should take into account the control logic applied at that time.

Once the diagnosis is done and the reconfiguration point identified, a new configuration is chosen. This configuration has to be evaluated before its implementation. Simulation is widely used to address this issue. (Cardin and Castagna, 2006), (Lateef-Ur-rehman, 2013). Yet, building a simulation model of a complex system, is difficult. Nevertheless, the use of the system modularity could lead to a modular build of the simulation model. That is, each subsystem is faithfully represented by a simulation model, as it is in real life. This principle of modularity in simulation models has been widely applied during the last decades to easily evaluate manufacturing system (Hibino et al., 2002).

Therefore, modularity is seen as an answer to the system complexity. It helps in a deep knowledge about the system and guide the reconfiguration strategy. As the reconfiguration decision is made regarding the system level, the evaluation of the results of each subsystem have to be considered at the system level. Thereby, arises the need to aggregate subsystem's KPIs, simulation models and even control logic. This issue is the one addressed by this paper. Our target is to investigate the modularity of the system regarding the simulation model, control logic and KPI of the system, and to study the aggregation of the module in order to have accurate data at the system level for reconfiguration decision making. Far from proposing rigid models of aggregation, the aim of the paper is to provide opportunities of thinking about the notion of aggregation of simulation models, KPI and control logic within manufacturing context. Herein, the aim of the paper is to highlight the importance of aggregation, especially within the process of reconfiguration decision making for modular manufacturing systems.

The remainder of this article is as follow: section 2 presents the modular vision of RMS, section 3 states the

aggregation problem and present the role of aggregation. Section 4 uses an illustrative example to present some ideas about aggregation methods. Finally section 5 discusses and concludes the paper.

2 A MODULAR VISION OF RMS

Modularity helps in reducing the system complexity. It concerns physical and logical aspect (Koren and Shpitalni, 2010), but also KPIs and even simulation model used to represent the system. A module is then considered as a system element with four aspects: physical, logical, KPIs and simulation. The aggregation of several modules constitute the system. Hence, choosing a new configuration will be choosing the modules that will be put together (aggregated) and define how the aggregation will be made. The highest module represents the system itself.

The physical aspect of the module (PM) refers to tangible element in the real life. It could be a workstation, operators, storage system, etc. It is managed by a control logic, and has related KPI and simulation model. Before implementing the PM in real life, its simulation model can be used for evaluation.

The control aspect (CM) describes the behavior and manages the PM. It represents the intelligence of the PM. CM is faithfully replicate in the simulation aspect of the module, to ensure the correspondence between the real world and virtual word.

The simulation aspect (SM) is the virtual representation of the module. It allows to evaluate modules as it would be in real life situation. Simulation aspect of the module gives an insight of the system in case of reconfiguration process.

The KPIs measure the performance of the module. Value could either be measured on the real system or simulated. It allows the diagnosis of the module, and triggers the reconfiguration decision.

A representation of this module-based view of RMS is given on (**Fig. 5**). This module based view of the system allow to reduce the system complexity regarding the design or even the evaluation of the configuration, thus ease the reconfiguration process. The remaining issue concerns the aggregation of the modules

3 AGGREGATION: PROBLEM STATEMENT AND ROLE

3.1 Problem statement

To better understand the issue, let us consider the following example: A manufacturing system made of two workstations M1 and M2. M1 behaves following the FIFO (First in First out) rule and its utilization rate is represented by the curve denoted M1 on **Fig. 1**. Whereas M2 follows a particular control logic, depending on the product and its utilization curve is denoted M2 on **Fig. 1**.

In order to study the behavior of the system, the models of M1 and M2 are put together. It is therefore necessary to consider an aggregation function that will allow the system (upper level) to combine the different information from the lower levels (i.e from M1 and M2). For example, what would be the utilization rate to consider? **Fig. 2** gives an glimpse of possible answers. At the system level, solution 1 considers the utilization rate as the sum of M1 and M2. Solution 2 considers maximum (Max) between M1 and M2, and solution 3 the average between M1 and M2.

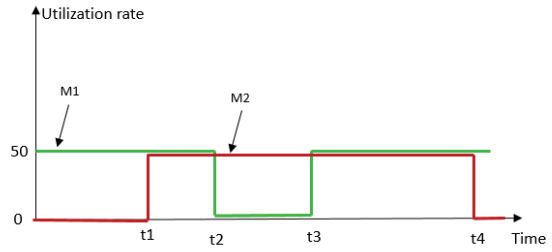


Fig. 1: utilization rate shape per workstations

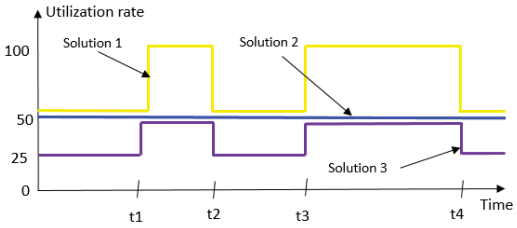


Fig. 2: utilization rate shape for the system

A simulation model of M1 is build, as well as for M2. Both faithfully represent the workstation and their behavior as it might be in real life situation, so that the study of the simulation model would help in reconfiguration decision. While building the system simulation model, what would be the system behavior, i.e. what would be the control logics at the system level?

3.2 Role of aggregation

Aggregation functions are usually defined and used to combine and resume several values into one, so that the end result of the aggregation takes into account, in a specified way, all the individual values. The notion of aggregation functions is widely used in statistics, economics, finance or even informatics (information retrieval) (Moulahi, 2015), where aggregated values are often numerical or strings, as KPIs in manufacturing domain.

The reconfiguration decision at the system level takes into account the KPIs of each the module within a configuration. Even though the module is evaluated individually, it contributes to the system's performance. Therefore, the aggregation function of KPIs is needed and should be chosen carefully. Many mathematical functions are used to address numerical aggregation issue. Depending on the context and the purpose of the study, functions such as quadratic mean, minimum, maximum, standard deviation, etc. could be chosen (Bouyssou et al., 2006). As modules of the system have an impact on each other and exchange information. Aggregating two modules results in determining what will be KPIs and the behavior of the system. That is to de-

termine the control logic that will be applied at the system level to manage several aggregated modules. Herein, the aggregation of control logic is required (Leitão, 2004), as well as the aggregation of simulation model for a relevant evaluation of the system.

For simulation models, High Level Architecture (HLA) is a standard that promotes aggregation, interoperability between simulations, and aid the reuse of models in different context (IEEE 1516, 2000). More often, HLA is used when simulations use different several activities: each activity is represented by a simulation model which is then connected and coordinated with other model. HLA has proposed standards to support the interoperability within simulation of a whole system that involved several manufacturing actives such as materials activity, production activity and even commercial-marketing activity. Each activity often has its simulator, and the drawback that remains when applying the standards in real life is about combining models from different simulators (Pedrielli et al., 2011). The literature review conducted by (Thein, 2019) gives a great overview about previous works carried in this field. So far, the concept of HLA has been implemented for systems with different activities and simulations. The scope of this paper is limited on the production activity, where the simulation models of each sub model is built with the same simulator. Unlike HLA where the system will need a RTI (Run Time Infrastructure) to support information exchange between models, here the models belong to the same simulation software. It is therefore not necessary to transit information through a RTI. However, the different models must be able to communicate in a consistent manner to ensure the consistency of the production system model. Therefore, in addition to KPIs and control logic aggregation, simulation models have to be aggregated (**Fig. 3**).

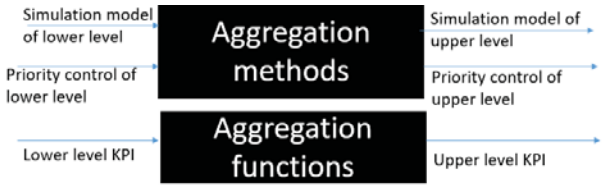


Fig. 3: Role of the aggregation functions

4 ILLUSTRATIVE EXAMPLE

Let us consider a manufacturing line made of three workstations: M1, M2 and M3. The system manufactures two types of product (P1 and P2) that both uses M1 and M2 with different operational time here denoted time unit (tu). M3 is the same as M2. M1 behaves in FIFO, M2 gives priority to product P1 and M3 to product P2. There is a storage zone for M2 and M3. (**Fig. 4**).

The modular decomposition of the line considers the following modules: Et (entry), M1, M2 M3, Ex (exit). Each has its simulation model, KPI and logical control. The system model is obtained by putting together the module models. The KPI of the system depend on the module's KPI, and the behavior on a system level is added to manage control logic of each workstation. The following details the aggregation methods used for this example. FlexSim© is the simulation software used for this example.

Table 1: operation time by product by workstation

Product	Operation 1on M1	Operation 2 on M2 or M3
P1	2 tu	5 tu
P2	2 tu	10tu

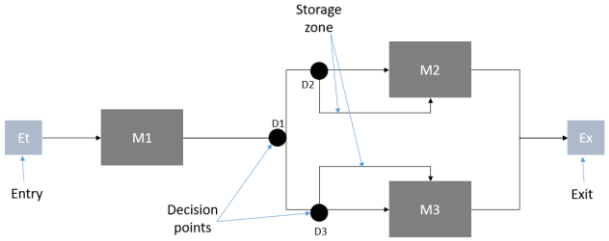


Fig. 4: system scheme

4.1 Aggregation of simulation models and control logic

For the aggregation of models, we propose to build simulation libraries. For each module, an object and the behavior describing the module are associated. The resulting element is stored in a library, so that whenever the module is needed, it can be easily extracted from the library. Thus, to each module of the system, we will associate a virtual module that describes it. The construction of the simulation model of the system will then import from the library all the modules we need. This saves time in the construction of the model, since the control logic relative to each module will already be associated to the module. For this example, **Fig. 6** and **Fig. 8** show the elements of the library created and the logic associated with each module.

Yet, the issue remains the communication between the elements of the library. To make them work together, a control logic that will trigger and manage the system is needed. We find here the notion of aggregations for the control logics. To manage the system very often the control logic at the system level is obtained by assigning priority order to the decisions taken by the different modules at specific times (Barbosa *et al.*, 2015). These priorities can change over time, or remain fixed. They are very often logics of the type {if, … else}.

In our case, the module models are retrieved from the library and a coordination logic is added. This logic may be stored in a library or not. It can be derived from priority rules as shown in this example. The priority order between M2 and M3 is manage by a system logic that switches between satisfying control logic of M2 and M3 or impose a new rule in order to avoid the system from stuck. In order words the logic at the system level is the following:

When workstations are available (i.e idle or there is a place in the storage), follow the priority of M2 and M3 (i.e send P1 on M2 and P2 on M3).

If M2(3) is busy (i.e its storage full) ask for the availa-

bility of M3(2). If M3(2) is available, send products (P1 and P2) on M3 (2), else, stop production on M1, till a workstation become available.

This rule is described by the logic on (**Fig. 7**). It is important to notice that, the logic both of the modules and the system, is built independently of the "object" representing the physical aspect. Thus we can easily add a new workstation (eg. Workstation type 1) to the system without deep changes. In other words, adding a new workstation means to add an object workstation from the library and associate the appropriate logic (the one describing the type 1 workstations), then add the behavior of the new workstation the system control.

The simulation model aggregation is possible with the use of a library, and the control logic aggregation, by defining an upper control that uses the lower control in addition to a priority rule.

4.2 Aggregation of KPI

Many KPI could be used for a system evaluation. (ISO 22400, 2014) described a set of KPI for manufacturing context. (Zhu *et al.*, 2018) proposed a framework to organizing KPI regarding three types : measurement, equipment and process. For our example, we choose to study aggregation of one KPI from each section: Work In Progress (WIP) for measurement, utilization rate (U) for equipment and Throughput (T) for process.

Simulated valued for modules are given in **Table 2**.

4.2.1 Aggregation of WIP

At the system level, the WIP is considered as the sum of the WIP of each workstation. Of course the workstations include possibilities for storing product awaiting production.

$$WIP_{System} = \sum_{i=1}^{n} WIP_{Mi} + \varepsilon_{WIP} \quad (1)$$

$$WIP_{System} = WIP_{M1} + WIP_{M2} + WIP_{M3} + \varepsilon_{WIP} \quad (2)$$

ε_{wip} represents the products located on the transportation equipment between two successive work stations. If the two workstations follow each other (without transport agent) then ε_{wip} is zero. In some applications ε_{wip} can be neglected. However, for a complete analysis and evaluation at system level, it is better to take it into account. The use of this aggregation function allows us to determine the system WIP, and thus to evaluate the performance of the configuration. A reconfiguration decision could aim at reducing the system WIP.

4.2.2 Aggregation of Utilization rate

The simulation shows that M2 and M3 are almost completely used; whereas, M1 is still available up to 40%. The utilization rate of the system should integrate this two data. More often, the utilization rate at the system level is calculated by using the arithmetic mean of workstation. This could be explained by the fact that workstations are often the most requested in the system. In this study we realize that the result obtained by just considering the workstation gives a glimpse, but not a very representative state of the system. Hence, we propose to considered the utilization rate of other modules such as transportation, storage. The aggregation will be made as follow:

$$U_{System} = \frac{\sum_{i=1}^{m} U_{Mi} + \sum_{j}^{n-m} U_{Other\ than\ Mi}}{n} \quad (3)$$

$$U_{System} = \frac{U_{M1} + U_{M2} + U_{M3} + U_{Et} + U_{Ex}}{5} \quad (4)$$

4.2.3 Aggregation of Throughput

The throughput represents the average number of products that can be manufactured per hour. The simulation for our example shows that, M1 has a higher throughput than M2 and M3. This can be explained by the fact that, the product coming from M1 are split between M2 and M3 for final operations. Thus, at the system level, the throughput will depend both on the throughput of M1 and on the sum of the throughput of the workstations that perform the last operation of the task list (M2 and M3). The throughput at the system level is then obtained by considering the minimum between these two:

$$T_{System} = Min\{(T_{M2} + T_{M3});\ T_{M1}\} \quad (5)$$

5 DISCUSSION AND CONCLUSION

The aggregation method for simulation and control logic models is implemented by using libraries containing representations of each module of the system. The construction of a new configuration consists of importing the necessary objects from the library, associating the necessary control logic to them, and finally, defining the logic to be applied to the whole system, according to the needs and objectives of the configuration. With the modular construction of the simulation model, the proposition of a new configuration can be easily tested and evaluated. This significantly reduces the time required to build the simulation model. Nevertheless, the concept of the simulation library remains a solution that can be adapted to various manufacturing contexts, as long as the system is modular.

About KPIs, their analysis allows an in-depth diagnosis of the system and allow to determine the causes of possible disturbances. For our example, we used simulation to obtain KPIs of each module, nevertheless, these valued could be measured on the real system. KPIs can lead to the identification of a bottleneck station in the system and thus lead to a reconfiguration decision. E.g. The system is too much busy because M3 is full (U =99%) and its Storage always full (WIP=10), means that M3 is a bottleneck. A reconfiguration decision could be to duplicate M3. As the system and the KPIs are modular, it is easier to identify the origin of the problems and to provide a targeted solution. However, the KPI aggregation functions proposed here remain

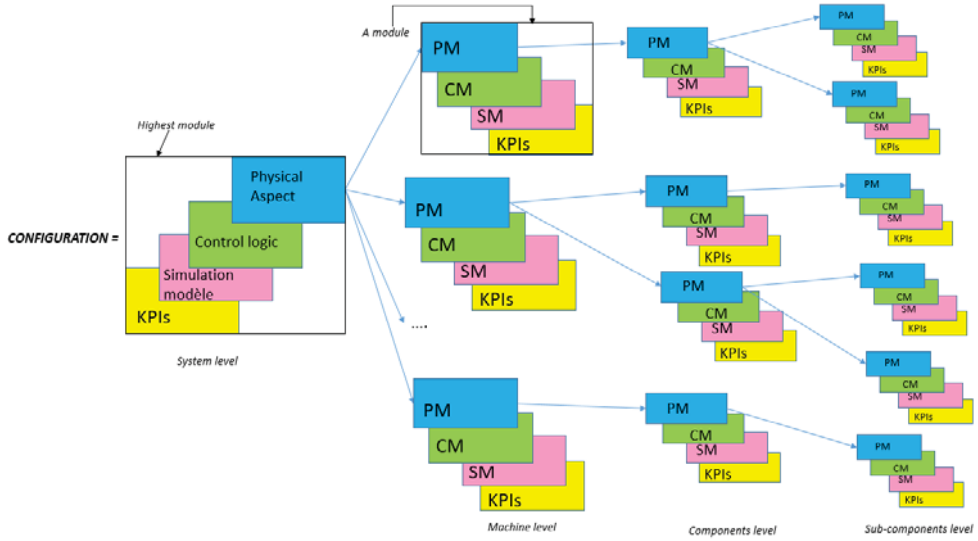


Fig. 5: A modular vision of the system

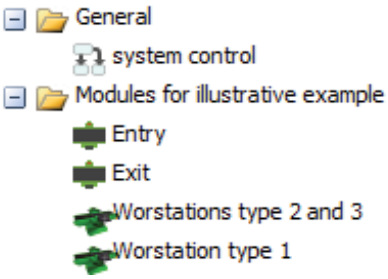


Fig. 6: Library of modules

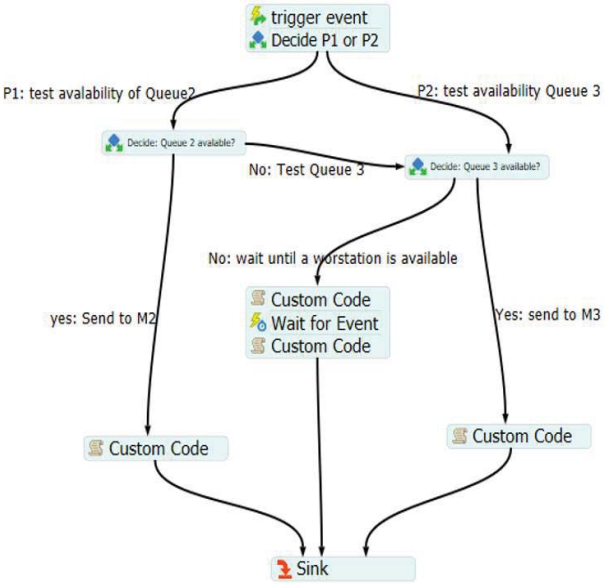


Fig. 7: control logic that manages the system

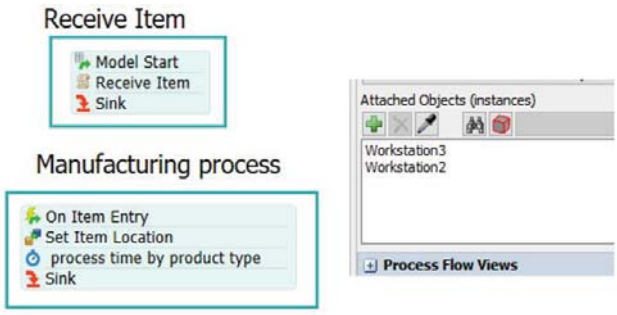


Fig. 8: control logic with attached workstations

Table 2: Modular analysis of KPIs

	Machine level					**System level**
	ET	M1	M2	M3	Ex	**Configuration (aggregation)**
U(%)	99.79	53.55	99.86	99.92	99.85	**90.6**
T	966	965	507	454	960	**960**
WIP	--	9	10	10	--	**29**

specific to the example. But, they can be extended to similar systems (i.e. modular), or inspire the definition of aggregation functions for other modular systems.

Aggregation is important for a relevant analysis and evaluation of the system, and the notion of modularity helps by reducing the complexity and guiding to a relevant diagnosis of the system. Yet, modularity could be a source of complexity in the analysis if the relationships between modules are not well defined. As production contexts are very different, it is very difficult to generalize aggregation functions. But the idea of building simulation libraries and control logics already allows a step forward in the application of modularity. The construction of new configurations by module aggregation is similar to the formation of holarchies in holonic systems (Chacón *et al.*, 2012) and to the modular construction of digital twins (Redelinghuys *et al.*, 2019). The notion of aggregation proposed here can thus be used to feed some discussion concerning the issue about aggregating data and models within holonic system or digital twins.

ACKNOLEGDMENT

This research work is supported by funding of the PhD program PERFORM (Fundamental research and development program resourcing on manufacturing) from the IRT Jules Verne (https://www.irt-jules-verne.fr/).

REFERENCES

Barbosa, J. et al. (2015) 'Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution', Computers in Industry, 66, pp. 99–111. doi: 10.1016/j.compind.2014.10.011.

Bouyssou, D. et al. (2006) Concepts et méthodes pour l'aide à la décision, volume 1, outils de modélisation. Hermès. Available at: http://www.eyrolles.com/Informatique/Livre/9782746212893/livre-concepts-et-methodes-pour-l-aide-a-la-decision-volume-1.php?xd=aaf52345a1d296102019828431284 0ab.

Capawa Fotsoh, E. et al. (2020) 'A Classification for Reconfigurable Manufacturing Systems', in Benyoucef, L. (ed.) Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation. Cham: Springer International Publishing, pp. 11–28. doi: 10.1007/978-3-030-28782-5_2.

Cardin, O. and Castagna, P. (2006) 'Handling uncertainty in production activity control using proactive simulation', IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). IFAC, 12(PART 1). doi: 10.3182/20060517-3-fr-2903.00297.

Chacón, E. et al. (2012) 'Planification en ligne pour les systèmes de production distribués: une approche par les systèmes holoniques'.

Hibino, H. et al. (2002) 'Manufacturing adapter of distributed simulation systems using HLA', in, pp. 1220–1228.

IEEE 1516 (2000) IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA).

ISO 22400 (2014) Automation Systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management.

Koren, Y. and Shpitalni, M. (2010) 'Design of reconfigurable manufacturing systems', Journal of Manufacturing Systems. Elsevier Ltd, 29(4), pp. 130–141. doi: 10.1016/j.jmsy.2011.01.001.

Lameche, K. et al. (2017) 'Modularity in the design of reconfigurable manufacturing systems', IFAC-PapersOnLine. Elsevier B.V., 50(1), pp. 3511–3516. doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.939.

Lateef-Ur-rehman, A. (2013) 'Manufacturing configuration selection using multicriteria decision tool', International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65(5–8), pp. 625–639. doi: 10.1007/s00170-012-4201-5.

Leitão, P. (2004) An Agile and Adaptive Holonic Architecture for Manufacturing Control. University of Porto.

Maier-Speredelozzi, V. and Hu, S. J. (2002) 'Selecting manufacturing system configurations based on performance using AHP', Technical Paper Society of Manufacturing Engineers MS, (MS02-179), pp. 1–8. Available at: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0036300907&partnerID=40&md5=9c626532220edfae6e8665340a066dcd.

Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G. and Koren, Y. (2000) 'Reconfiguration manufacturing systems: Key to future manufacturing', journal of intelligent manufacturing, 11, pp. 403–419.

Moulahi, B. (2015) Définition et évaluation de modèles d'agrégation pour l'estimation de la pertinence multidimensionnelle en recherche d'information. Available at: http://thesesups.ups-tlse.fr/2977/%0Ainternal-pdf://0.0.0.70/2977.html.

Pedrielli, G. et al. (2011) 'Simulation of complex manufacturing systems via HLA-based infrastructure', in Proceedings - Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation, PADS. IEEE. doi: 10.1109/PADS.2011.5936772.

Redelinghuys, A., Basson, A. and Kruger, K. (2019) 'A Six-Layer Digital Twin Architecture for a Manufacturing Cell', in Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, pp. 273–284. doi: 10.1007/978-3-030-03003-2.

Thein, N. N. M. (2019) 'Implementing Data Distribution Management System Using Layer Partition-based Matching Algorithm', Proceedings of 2019 the 9th International Workshop on Computer Science and Engineering, WCSE 2019 SPRING, 9(1), pp. 68–72. doi: 10.18178/wcse.2019.03.012.

Zhu, L. et al. (2018) 'Key performance indicators for manufacturing operations management in the process industry', IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2017-Decem(December), pp. 969–973. doi: 10.1109/IEEM.2017.8290036

PROGRAMMATION LINEAIRE EN NOMBRES ENTIERS POUR L'ORDONNANCEMENT DE PROJET MULTI-COMPETENCE AVEC PREEMPTION PARTIELLE

Christian ARTIGUES, Pierre LOPEZ, Oliver POLO MEJIA

LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, France
{christian.artigues, pierre.lopez, oliver.polo-mejia}@laas.fr

RÉSUMÉ : *Dans cet article, nous considérons le problème d'ordonnancement de projet à compétences multiples connu dans la littérature sous l'abréviation MSPSP (*multi-skill project scheduling problem*). Nous proposons une nouvelle variante de ce problème en intégrant le concept original de préemption partielle. Il s'agit d'une version de la préemption où seul un sous-ensemble de ressources est libéré pendant les périodes de préemption, au croisement donc des cas considérés dans les versions préemptives (toutes les ressources sont libérées pendant les périodes de préemption) et non-préemptives (pas d'interruption des activités). Le problème d'ordonnancement de projet à compétences multiples avec préemption partielle qui en résulte, appelé MSPSP-PP, est modélisé mathématiquement par différentes formulations en programmation linéaire en nombres entiers. Des études théoriques et expérimentales permettent d'évaluer les performances respectives des formulations proposées.*

MOTS-CLÉS : *recherche opérationnelle, ordonnancement de projet, multi-compétence, préemption partielle, programmation linéaire en nombres entiers.*

1 INTRODUCTION

Les problèmes d'ordonnancement préemptif supposent que toutes les ressources sont libérées pendant les périodes de préemption et qu'elles peuvent être utilisées pour d'autres activités. Cependant, dans certains cas, les contraintes exigent qu'un sous-ensemble de ressources restent affectées à l'activité lorsque celle-ci a été interrompue, pour des questions de sécurité par exemple. Supposons que l'on doive exécuter une activité expérimentale qui nécessite une atmosphère inerte pour son exécution. En pratique, on peut arrêter cette activité et permettre aux techniciens et à une partie des équipements d'être utilisés pour d'autres activités. Cependant, des contraintes de sécurité et de fonctionnement peuvent nous obliger à préserver l'atmosphère inerte même lorsque l'activité est suspendue. En d'autres termes, on ne peut pas libérer les équipements qui assurent l'atmosphère inerte pendant les périodes de préemption. Les modèles traditionnels de calendrier de préemption ne peuvent pas représenter ce comportement puisqu'ils supposent que toutes les ressources sont libérées pendant les périodes de préemption. Jusqu'à présent, la seule façon de modéliser ce type d'activité, tout en respectant les exigences de sécurité, était de la déclarer "non-préemptive". Cependant, cette décision peut augmenter la durée du projet, en particulier lorsque les activités ont des fenêtres temporelles restrictives et que disponibilité et capacité des ressources varient dans le temps. Nous appelons *préemption partielle* la possibilité de ne libérer qu'un sous-ensemble de ressources pendant les périodes de préemption d'une activité.

Nous nous intéressons ici au problème d'ordonnancement de projet multi-compétence (*multi-skill project scheduling problem* ou MSPSP) (Néron, 2002), (Bellenguez et Néron, 2008), (Montoya *et al.*, 2015). Nous présentons dans cet article une nouvelle variante du MSPSP qui utilise le concept de préemption partielle. Cette variante, appelée problème d'ordonnancement de projet multi-compétence avec préemption partielle (MSPSP-PP), n'a pas, à notre connaissance, été étudiée par d'autres auteurs dans la littérature scientifique (Hartman et Briskorn, 2010), (Orji et Wei, 2013).

Dans le MSPSP-PP, si une activité est interrompue, un sous-ensemble de ressources est libéré pendant que le sous-ensemble complémentaire reste associé à l'activité. L'ensemble $\overline{I}$ d'activités peut être classé en trois types selon la possibilité de libérer les ressources pendant les périodes de préemption : 1) les activités non-préemptives ($\overline{NP}$), si aucune des ressources ne peut être libérée ; 2) les activités partiellement préemptives ($\overline{PP}$), si un sous-ensemble de ressources peut être libéré ; et 3) les activités préemptives ($\overline{P}$), si toutes les

Activité	Durée	(Compétence requise, Quantité)	(Ressource requise, Quantité)	Date échue	Date de disponibilité	Type
A_1	4	$(c_1, 1)$	$(M_1, 1)$	–	–	$\overline{P}$
A_2	2	$(c_3, 1), (c_4, 1)$	$(M_1, 1)$	5	3	$\overline{NP}$
A_3	4	$(c_2, 1)$	$(M_1, 1)$	–	–	$\overline{PP}$ (M_1 ne doit pas être libérée)

	Technicien	Compétences maîtrisées	Ressource	Capacité
	$tech_1$	$\{c_1, c_3\}$	M_1	2
	$tech_2$	$\{c_2, c_4\}$		

Tableau 1 – Exemple d'instance de problème d'ordonnancement de projet multi-compétence partiellement préemptif (MSPSP-PP)

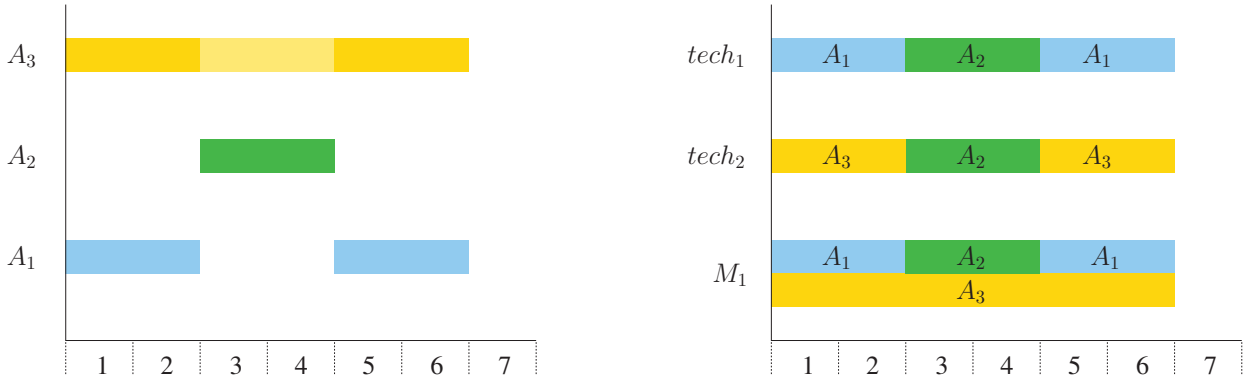


FIGURE 1 – Solution admissible de l'instance du tableau 1

ressources peuvent être libérées.

Motivés par une application réelle (Polo Mejía *et al.*, 2019b), notre objectif au niveau de l'ordonnancement est essentiellement de réaliser toutes les tâches dans la limite d'un horizon imposé, en respectant toutes les contraintes, notamment celles propres au MSPSP liées aux compétences des techniciens. Cela justifie la considération d'une fonction objectif de minimisation de la durée totale du projet (*makespan* $C_{\max}$), qui permet de réaliser toutes les tâches au plus tôt en maximisant naturellement l'utilisation des ressources.

Trouver une solution consiste à déterminer les périodes pendant lesquelles chaque activité est exécutée et quelles ressources exécuteront l'activité dans chaque période, tout en respectant la capacité des ressources et les caractéristiques des activités. Les ressources considérées sont renouvelables et à capacité limitée. Il peut s'agir de ressources monovalentes (à compétence unique) cumulatives (machines ou équipements) ou de ressources polyvalentes (multi-compétences) disjonctives (techniciens) maîtrisant plusieurs compétences. Les ressources polyvalentes peuvent répondre à plus d'une exigence de compétence par activité et peuvent l'exécuter partiellement (sauf pour les activités non-préemptives où les techniciens doivent exécuter l'activité entière). Dans notre étude, la préemption partielle ne concerne que les ressources monovalentes (ensemble $\overline{K}$). Plus précisément si une activité est soumise à la préemption partielle, alors c'est la ressource monovalente qu'elle utilise qui ne peut être libérée.

Une activité i est définie par sa durée D_i, ses relations de précédence $(i, l) \in \overline{E}$, son besoin $Br_{i,k}$ d'une ressource $k \in \overline{K}$ disponible en quantité $DR_{k,t}$ en période t, son besoin $Bc_{i,c}$ d'une compétence $c \in \overline{C}$, le nombre minimum de techniciens nécessaires pour l'exécuter Nt_i et le sous-ensemble de ressources préemptives. Les activités peuvent avoir ou non une date de disponibilité r_i et une date d'échéance d_i (périodes). Le tableau 1 et la figure 1 illustrent un exemple d'une instance MSPSP-PP et une solution possible.

La complexité du MSPSP-PP peut être établie en utilisant le RCPSP (*Resource-Constrained Project Scheduling Problem*) classique comme point de départ. A

chaque instance du RCPSP, nous pouvons faire correspondre une instance du MSPSP-PP, où toutes les ressources sont monovalentes et aucune d'elles ne peut être préemptée. Ainsi, nous pouvons définir le RCPSP comme un cas particulier du MSPSP-PP. Etant donné la forte NP-difficulté démontrée du RCPSP (Blazewicz *et al.*, 1983), nous pouvons donc en déduire que le MSPSP-PP est également NP-difficile au sens fort.

Dans la suite, nous présentons cinq formulations du MSPSP-PP utilisant la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) et nous étudions leurs performances respectives par des comparaisons théoriques et expérimentales.

2 FORMULATIONS MATHEMATIQUES

Nous présentons dans ce paragraphe quatre formulations du MSPSP-PP indexées par le temps sur un horizon discrétisé $\overline{H}$.

Ces formulations généralisent celles déjà proposées dans (Polo Mejía *et al.*, 2018), (Polo Mejía *et al.*, 2019b) et de nouvelles comparaisons théoriques et expérimentales sont présentées par rapport à ces précédents travaux. Tous les modèles sont basés sur des variables binaires on/off $Y_{i,t}$ indiquant si une activité i est en cours pendant la période t, des variables binaires on/off $O_{j,i,t}$ pour un technicien $j \in \overline{J}$ affecté à une activité $i \in \overline{I}$ pendant la période $t \in \overline{H}$, des variables binaires $S_{j,i}$ pour un technicien j affecté à une activité non-préemptive i (tout technicien affecté à une activité non-préemptive doit y rester affecté jusqu'à ce que l'activité soit terminée). Pour toute activité partiellement préemptive i, une variable binaire on/off $Pp_{i,t}$ indique si l'activité i est préemptée dans la période t.

2.1 Modèle MSPP1

Pour le premier type de modèle, nous utilisons une variable binaire de type "step" $Z_{i,t}$ qui précise si l'activité partiellement préemptive ou non-préemptive i commence en période t ou avant, et une variable binaire du même type $W_{i,t}$ pour une activité partiellement préemptive ou non-préemptive i se terminant en période t ou après. La première formulation (nommée MSPP1a) s'écrit comme décrit au tableau 2.

L'expression (1) correspond à la fonction objectif de minimisation du makespan du projet. Les contraintes (2) assurent la satisfaction des besoins en ressources pendant les périodes d'exécution ($Y_{i,t} = 1$) et aussi la satisfaction des besoins en ressources non-préemptives ($PR_{i,k} = 1$) pendant les périodes de préemption ($Pp_{i,t} = 1$). Les contraintes (3) garantissent le respect de la disponibilité des techniciens, et la contrainte disjonctive ; $DO_{j,t} = 1$ si le technicien j est disponible en période t. Avec les contraintes (4) et (5), nous garantissons que les besoins en ressources, compétences et nombre minimal de techniciens sont satisfaits pendant les périodes d'exécution ; $CO_{j,c} = 1$ si le technicien j maîtrise la compétence c. Les contraintes (6) imposent que chaque activité s'exécute durant toute sa durée et dans sa fenêtre temporelle. Les contraintes de précédence sont indiquées dans (7). Ces contraintes expriment le fait que, dans tous les cas, la somme des parties de i en exécution à partir de t ne peut excéder la quantité D_i ; de plus, si l est en exécution en période t, l'activité i, qui doit précéder l'activité l, ne peut pas être en exécution sur toute période à partir de t. Les contraintes (8) obligent la variable binaire auxiliaire $Z_{i,t}$ à être égale à 1 pour toutes les périodes à partir de la date de début de l'activité. Les contraintes (9), en revanche, forcent la variable binaire auxiliaire $W_{i,t}$ à être égale à 1 pour toutes les périodes jusqu'à la date d'achèvement de l'activité. Grâce aux contraintes (10), nous déterminons les périodes pendant lesquelles une activité partiellement préemptive a été préemptée (ou non). Ces contraintes stipulent que les activités dans leur intervalle d'exécution ($Z_{i,t} = 1$ et $W_{i,t} = 1$ simultanément) doivent être soit en exécution ($Y_{i,t} = 1$) soit préemptées ($Pp_{i,t} = 1$). Les contraintes (11) garantissent que les activités non-préemptives ne sont pas interrompues. Les contraintes (12) et (13) stipulent que tous les techniciens affectés à une activité non-préemptive doivent l'exécuter jusqu'à son terme. Enfin, les contraintes (14) expriment la durée totale du projet.

Grâce aux variables $W_{i,t}$ et $Z_{i,t}$, nous pouvons aussi utiliser une version désagrégée des contraintes de précédence (7) :

$$Z_{l,t} + W_{i,t} \leq 1 \quad \forall (i,l) \in \overline{E}, \forall t \in \overline{H} \tag{15}$$

Le modèle où les contraintes (7) sont remplacées par les contraintes (15) est appelé MSPP1b.

2.2 Modèle MSPP2

Nous proposons également deux modèles mixtes continu/discret (MSPP2a et MSPP2b), en remplaçant les variables binaires $W_{i,t}$ et $Z_{i,t}$ par des variables à temps continu G_i et F_i représentant respectivement les dates de début et de fin de l'activité i. Nous remplaçons ainsi les contraintes (7–11) du modèle MSPP1a par les contraintes (16–21) ci-après :

$$\min(C_{\max}) \tag{1}$$

$$\left(\sum_{i\in\overline{I}} Y_{i,t} + \sum_{i\in\overline{PP}} PR_{i,k} * Pp_{i,t}\right) * Br_{i,k} \leq DR_{k,t} \qquad \forall k \in \overline{K}, \forall t \in \overline{H} \tag{2}$$

$$\sum_{i\in\overline{I}} O_{j,i,t} \leq DO_{j,t} \qquad \forall j \in \overline{J}, \forall t \in \overline{H} \tag{3}$$

$$Y_{i,t} * Bc_{i,c} \leq \sum_{j\in\overline{J}} (O_{j,i,t} * CO_{j,c}) \qquad \forall i \in \overline{I}, \forall c \in \overline{C}, \forall t \in \overline{H} \tag{4}$$

$$\sum_{j\in\overline{J}} O_{j,i,t} \geq Y_{i,t} * Nt_i \qquad \forall i \in \overline{I}, \forall t \in \overline{H} \tag{5}$$

$$\sum_{t=\max(1,r_i)}^{\min(d_i,|\overline{H}|)} Y_{i,t} \geq D_i \qquad \forall i \in \overline{I} \tag{6}$$

$$D_i * (1 - Y_{l,t}) \geq \sum_{t'=t}^{\overline{H}} Y_{i,t'} \qquad \forall (i,l) \in \overline{E}, \forall t \in \overline{H} \tag{7}$$

$$Z_{i,t} \geq Y_{i,t'} \qquad \forall i \notin \overline{P}, \forall t \in \overline{H}, \forall t' \leq t \tag{8}$$

$$W_{i,t} \geq Y_{i,t'} \qquad \forall i \notin \overline{P}, \forall t \in \overline{H}, \forall t' \geq t \tag{9}$$

$$Pp_{i,t} = Z_{i,t} + W_{i,t} - Y_{i,t} - 1 \qquad \forall i \in \overline{PP}, \forall t \in \overline{H} \tag{10}$$

$$Z_{i,t} + W_{i,t} - Y_{i,t} = 1 \qquad \forall i \in \overline{NP}, \forall t \in \overline{H} \tag{11}$$

$$O_{j,i,t} \geq S_{j,i} + Y_{i,t} - 1 \qquad \forall i \in \overline{NP}, \forall j \in \overline{J}, \forall t \in \overline{H} \tag{12}$$

$$O_{j,i,t} \leq S_{j,i} \qquad \forall i \in \overline{NP}, \forall j \in \overline{J}, \forall t \in \overline{H} \tag{13}$$

$$C_{\max} \geq t * Y_{i,t} \qquad \forall i \in \overline{I}, \forall t \in \overline{H} \tag{14}$$

Tableau 2 – Modèle MSPP1a

$$F_i + 1 \leq G_l \qquad \forall (i,l) \in \overline{E} \tag{16}$$

$$Pp_{i,t} \leq 1 - Y_{i,t} \qquad \forall i \in \overline{PP}, \forall t \in \overline{H} \tag{17}$$

$$F_i - G_i + 1 \leq D_i + \sum_{t\in H} Pp_{i,t} \qquad \forall i \in \overline{PP} \tag{18}$$

$$F_i - G_i + 1 \leq D_i \qquad \forall i \in \overline{NP} \tag{19}$$

$$F_i \geq t * Y_{i,t} \qquad \forall i \in \overline{I}, \forall t \in \overline{H} \tag{20}$$

$$G_i \leq t * Y_{i,t} + (1 - Y_{i,t}) * |\overline{H}| \qquad \forall i \in \overline{I} \tag{21}$$

Les relations de précédence sont données par les contraintes (16). Les contraintes (17) indiquent que $Pp_{i,t}$ doit être égale à zéro si l'activité i est en exécution en période t. Les contraintes (18) font en sorte que $Pp_{i,t}$ prenne la valeur 1 pour les périodes où l'activité i a été préemptée. Les contraintes (19) garantissent que les activités de $\overline{NP}$ ne sont pas préemptées. La date de fin de chaque activité est calculée grâce aux contraintes (20). Enfin, les contraintes (21) donnent la date de début de chaque activité.

Il reste à exprimer le fait que les variables de préemption partielle $Pp_{i,t}$ doivent être égales à 0 en dehors de l'intervalle d'exécution de i. Nous utilisons, soit les contraintes (22) utilisant les variables Y (MSPP2a) :

$$\left.\begin{aligned} Pp_{i,t} &\leq \sum_{t'=1}^{t} Y_{i,t'} \\ Pp_{i,t} &\leq \sum_{t'=t}^{|\overline{H}|} Y_{i,t'} \end{aligned}\right\} \forall i \in \overline{PP}, \forall t \in \overline{H} \tag{22}$$

soit les contraintes (23) utilisant les variables F et G (MSPP2b) :

$$\left.\begin{aligned} F_i &\geq t * Pp_{i,t} \\ G_i &\leq t * Pp_{i,t} - (1 - Pp_{i,t}) * |\overline{H}| \end{aligned}\right\} \forall i \in \overline{PP}, \forall t \in \overline{H} \tag{23}$$

Dans la suite (paragraphes 3 et 4), nous comparons les formulations PLNE proposées en termes de qualité de borne obtenue par relaxation linéaire et de résultats expérimentaux sur des instances de problèmes.

3 COMPARAISON THEORIQUE DES FORMULATIONS

En utilisant les expressions de G_i et F_i, nous pouvons montrer que les contraintes du modèle MSPP2 sont toutes couvertes par les contraintes du modèle MSPP1.

Théorème 1. *Le modèle MSPP1 domine le modèle MSPP2.*

Démonstration. Nous opérons la transformation suivante (en rappelant que G_i et F_i correspondent respectivement aux dates de début et de fin de l'activité i) :

$$G_i = |\overline{H}| - \sum_{t \in \overline{H}} Z_{i,t} + 1 \text{ et } F_i = \sum_{t \in \overline{H}} W_{i,t}$$

Nous montrons dans la suite que les contraintes du modèle MSPP2 impliquant les variables F_i sont couvertes par les contraintes du modèle MSPP1 sur lequel nous avons effectué la transformation (nous nous restreignons aux activités dans $\overline{PP}$ sans perte de généralité) en inscrivant les valeurs des variables binaires dans l'intervalle continu $[0, 1]$.

En lien avec les contraintes (18), on a :

$$F_i - G_i + 1 \quad = \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} W_{i,t} + \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} Z_{i,t} - |\overline{H}|$$

que l'on peut simplifier, par l'expression (10), en :

$$F_i - G_i + 1 \quad = \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} Pp_{i,t} + \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} Y_{i,t}$$

$$= \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} Pp_{i,t} + D_i$$

En lien avec les contraintes (16), on a :

$$G_l - F_i - 1 \quad = |\overline{H}| - \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} Z_{l,t} - \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} W_{i,t}$$

L'expression (16) est satisfaite si et seulement si :

$$\sum_{t=1}^{|\overline{H}|} Z_{l,t} + \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} W_{i,t} \leq |\overline{H}|$$

qui est une conséquence des contraintes de précédence (15).

En utilisant les contraintes (9) et $F_i = \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} W_{i,t}$, nous arrivons également aux contraintes (20). Les contraintes (21) sont impliquées par les contraintes (9) et $G_i = |\overline{H}| - \sum_{t=1}^{|\overline{H}|} Z_{i,t} + 1$.

Le modèle MSPP1 est donc au moins aussi bon que le modèle MSPP2. De plus, comme les résultats expérimentaux (cf. paragraphe 4) montrent qu'il y a des cas où le modèle MSPP1 a une relaxation linéaire strictement meilleure que le modèle MSPP2, nous en déduisons que le modèle MSPP1 domine le modèle MSPP2. □

La dominance du modèle MSSP1 sur le modèle MSPP2 étant faite, nous avons également tenté d'établir une relation d'ordre entre les modèles MSPP1a et MSPP1b. Nous n'avons pas pu prouver de relation de dominance théorique entre ces modèles. En outre, les résultats expérimentaux montrent que tantôt certaines bornes obtenues par relaxation du modèle MSPP1a sont meilleures que celles obtenues par relaxation du modèle MSPP1b, tantôt le contraire (sur 200 instances générées, les résultats sont en faveur de MSPP1a pour 45 instances, en faveur de MSPP1b pour 6 instances, les résultats étant identiques pour le reste des 149 instances pour les deux formulations). Ceci justifie la proposition du modèle MSPP1c intégrant les deux types de formulation des contraintes de précédence (7) et (15), qui assure de toujours trouver la meilleure borne de relaxation.

4 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Pour les campagnes d'expérimentation, nous avons utilisé un ordinateur équipé d'un processeur Intel Xeon E5-2695 à 2,3 GHz fonctionnant sous Ubuntu 16.04. Nous utilisons le solveur IBM ILOG CPLEX 12.7 en utilisant la configuration par défaut et en limitant le nombre de threads utilisés par les solveurs à 8. Le temps de calcul a été limité à 10 minutes. Nous avons généré quatre ensembles, chacun de 50 instances, en faisant varier aléatoirement la proportion de type de préemption dans l'instance (tableau 3). Toutes les instances ont 30 activités d'une durée comprise entre 5 et 10 unités de temps, jusqu'à 15 compétences, 8 ressources cumulatives, 8 techniciens (ressources polyvalentes) répartis en deux équipes, 20% des activités ont des fenêtres de temps, une densité faible de relations de précédence, et un makespan optimal moyen $C_{\max}$ compris entre 70 et 90 unités de temps.

Données	A1	B1	C1	D1
$\overline{NP}$	10%	10%	80%	33.3%
$\overline{PP}$	10%	80%	10%	33.3%
$\overline{P}$	80%	10%	10%	33.3%

Tableau 3 – Distribution des types de préemption pour les instances du MSPSP-PP

Nous commençons par tester les performances des différentes variantes du modèle MSPP1. Comme les formulations indexées par le temps nécessitent une première estimation de l'horizon de planification, nous avons tout d'abord testé les formulations en utili-

sant la somme des durées d'activité comme horizon de planification. Pour améliorer les performances, nous avons ensuite bénéficié de l'option de démarrage à chaud ("*warm start*") de CPLEX en utilisant une première solution obtenue par un algorithme glouton (Polo Mejía *et al.*, 2019a). Le tableau 4 présente le nombre de cas pour lesquels l'optimalité a été prouvée, le temps moyen nécessaire pour prouver l'optimalité et l'écart moyen d'optimalité (distance entre la solution optimale ou la meilleure borne inférieure connue et la solution obtenue) pour chaque configuration du modèle MSPP1. D'après ces résultats, on peut conclure que l'utilisation simultanée des contraintes (7) et (15) (modèle MSPP1c) n'améliore pas les performances en pratique de la formulation MSPP1. En fait, elle peut même avoir un impact négatif puisqu'elle réduit le nombre de cas pour lesquels l'optimalité a été prouvée. Les configurations MSPP1a et MSPP1b ont un comportement similaire, et les tests statistiques ne permettent pas de dégager une différence sur le temps moyen pour obtenir l'optimalité ou sur l'écart à l'optimum. Toutes les formulations du modèle MSPP1 sont plus performantes lorsque la proportion d'activités préemptives est élevée (données A1). Cette performance diminue lorsque la proportion diminue, obtenant les plus mauvais résultats pour les données C1.

Une analyse similaire a été effectuée pour tester les deux formulations du modèle MSPP2. Là encore, inutile de se passer de la possibilité d'un démarrage à chaud qui améliore les performances à tous les niveaux. Le tableau 5 présente les résultats pour les deux configurations avec "warm start". Comme pour le modèle MSPP1, les performances du modèle MSPP2 s'amoindrissent avec l'augmentation du nombre d'activités non-préemptives. Rien ne permet réellement de conclure qu'une formulation domine l'autre. Toutefois, pour les données A1 (forte proportion d'activités préemptives), on peut dire que la configuration MSPP2b est plus rapide, et permet d'obtenir un écart moyen à l'optimum plus faible. Pour tous les autres jeux de données, les performances semblent être statistiquement égales.

Si nous comparons les résultats des meilleures formulations du modèle MSPP1 et du modèle MSPP2, nous pouvons conclure que le modèle MSPP1b est capable de prouver l'optimalité pour un plus grand nombre d'instances, et de donner un écart moyen plus faible pour tous les ensembles d'instances. Cependant, le modèle MSPP2b semble être plus rapide pour les cas des jeux d'instances A1 (nombre d'activités préemptives élevé). Pour une forte proportion d'activités non-préemptives, les deux modèles peinent à prouver l'optimalité. Ces résultats confirment qu'une formulation théoriquement plus forte n'implique pas nécessairement de meilleures performances en pratique.

5 CONCLUSION

Nous proposons dans cet article différentes formulations mathématiques de programmation linéaire en nombres entiers pour le problème d'ordonnancement de projet multi-compétence avec préemption partielle. Les formulations proposées sont comparées de manière théorique et expérimentale. Ces formulations obtiennent de meilleurs résultats que celle proposée par Maghsoudlou *et al.* (2019) pour le cas préemptif. Notons aussi que des approches de programmation par contraintes (Polo Mejía *et al.*, 2018), (Polo Mejía *et al.*, 2019b) dominent la meilleure formulation de PLNE sur les instances fortement non-préemptives, alors que les formulations de PLNE sont supérieures sur les instances préemptives. La conception d'une méthode exacte hybride serait ainsi une suite possible à ces recherches, ainsi que des analyses polyédrales poussées pour le RCPSP (partiellement) préemptif.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le SETC/DEC/DEN du CEA Cadarache, Saint-Paul-lez-Durance, France.

REFERENCES

Bellenguez-Morineau O. and E. Néron, 2008. Multi-mode and multi-skill project scheduling problem. In *Resource-constrained project scheduling: models, algorithms, extensions and applications*, C. Artigues, S. Demassey, E. Néron (Eds.), Wiley-ISTE, p. 149-160.

Blazewicz J., J.K. Lenstra and A.H.G. Rinnooy Kan, 1983. Scheduling projects subject to resource constraints: classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 5, p. 11-24.

Hartmann S. and D. Briskorn, 2010. A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 207(1), pp. 1-14.

Montoya C., O. Bellenguez-Morineau, E. Pinson and D. Rivreau, 2015. Integrated column generation and lagrangian relaxation approach for the multi-skill project scheduling problem. *Handbook on Project Management and Scheduling*, Springer International, pp. 565-586.

Néron E., 2002. Lower bounds for the multi-skill project scheduling problem. *Proceedings of the Eighth International Workshop on Project Management and Scheduling*, pp. 274-277, Valencia, Spain.

Orji I. M. J. and S. Wei, 2013. Project scheduling under resource constraints : A recent survey.

	MSPP1a			**MSPP1b**			**MSPP1c**		
	Nombre d'instances optimales	Temps moyen à l'optimum	Ecart moyen	Nombre d'instances optimales	Temps moyen à l'optimum	Ecart moyen	Nombre d'instances optimales	Temps moyen à l'optimum	Ecart moyen
A1	44	122.64 s	0.12 %	47	110.85 s	0.01%	47	123.28 s	0.05 %
B1	20	240.37 s	1.59 %	19	262.99 s	1.68 %	15	204.79 s	2.16 %
C1	0	-	9.37 %	0	-	9.43 %	0	-	9.43%
D1	16	286.36 s	2.23 %	18	289.35 s	1.85 %	16	267.32 s	2.30 %
Global	80	184.81 s	3.33 %	84	183.51 s	3.24 %	78	168.50 s	3.48 %

Tableau 4 – Résultats du modèle MSPP1 avec "warm start"

	MSPP2a			**MSPP2b**		
	Nombre d'instances optimales	Temps moyen à l'optimum	Ecart moyen	Nombre d'instances optimales	Temps moyen à l'optimum	Ecart moyen
A1	45	124.23 s	0.09%	46	87.39 s	0.05%
B1	14	119.19 s	2.79%	15	154.12 s	2.69%
C1	0	-	9.45%	0	-	9.45%
D1	19	194.22 s	2.12%	19	216.12 s	1.99%
Global	78	140.37 s	3.61%	80	130.48 s	3.55%

Tableau 5 – Résultats pour le modèle MSPP2 avec "warm start"

International Journal of Engineering Research and Technology, 2(2), pp. 1-20.

Maghsoudlou H., B. Afshar-Nadja, and S.T.A. Niaki, 2019. Preemptive multi-skilled resource constrained project scheduling problem with hard/soft interval due dates. *RAIRO-Operations Research*, 53(5), p. 1877-1898.

Polo Mejía, O., M.-C. Anselmet, C. Artigues, and P. Lopez, 2018. Mixed-integer and constraint programming formulations for a multi-skill project scheduling problem with partial preemption. *12th International Conference on Modelling, Optimization and Simulation (MOSIM 2018)*, Toulouse, France, p. 367–374.

Polo Mejía, O., C. Artigues, and P. Lopez, 2019a. A heuristic method for the multi-skill project scheduling problem with partial preemption. *8th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES 2019)*, Prague, Czech Republic, p. 111-120.

Polo Mejía, O., C. Artigues, P. Lopez, and V. Basini, 2019b. Mixed-integer/linear and constraint programming approaches for activity scheduling in a nuclear research facility. *International Journal of Production Research*, DOI:10.1080/00207543.2019.1693654.

SIMULATION D'UNE SALLE DE TISSAGE : IMPACT DU NOMBRE DE TISSERANDS SUR LES TEMPS D'ARRET DES MACHINES ET SUR LES RETARDS DE PRODUCTION

Ludwig DUMETZ, Jonathan GAUDREAULT

Université Laval, Québec, CANADA
ludwig.dumetz.1@ulaval.ca, Jonathan Gaudreault
jonathan.gaudreault@ift.ulaval.ca

Pascal FORGET
Université du Québec à Trois-Rivières, CANADA
pascal.forget@uqtr.ca

Nicolas Guerette

Duvaltex, Québec, CANADA
nicolas.guerette@duvaltex.com

RÉSUMÉ : *Dans cette étude, la simulation à évènements discrets est utilisée afin d'analyser l'impact du nombre de tisserands sur les temps d'arrêt des machines et sur les retards de production. Les tisserands sont responsables de finaliser les mises en course, lancer les tâches de production et réparer les bris simples au niveau du tissu qui surviennent pendant la production. Le métier s'arrête automatiquement lors du bris, mais l'opérateur doit faire une brève intervention pour relancer la production. Puisque chaque opérateur doit s'occuper de plusieurs métiers à tisser à la fois, il arrive que plusieurs des bris surviennent en même temps et donc que le métier soit arrêté pour une période plus longue que nécessaire. Ce délai d'attente (temps d'arrêt), réduisant du même coup le taux d'utilisation de la machine, a un impact indéniable sur la productivité. Il a notamment été montré que même si le taux d'utilisation des tisserands pouvait apparaitre bas, réduire le nombre de tisserands pouvait amener à une augmentation majeure de ce temps d'arrêt et donc dégrader fortement la productivité de la salle de tissage.*

MOTS-CLES : *Simulation, salle de tissage, temps d'arrêt, interférence des équipements*

1 INTRODUCTION

La production de textile est un processus à la fois simple, et complexe. D'un côté, le processus de tissage mécanisé est connu depuis le milieu du 18e siècle et les principes de base demeurent toujours les mêmes, soit l'entrecroisement de fils de chaine et de fils de trame. D'un autre côté, la cadence de production élevée et le grand nombre de produits fabriqués rendent les opérations de planification et de production complexes. Aujourd'hui, la production de textile au Canada compte plus de 1000 entreprises, principalement concentrées dans les provinces du Québec et de l'Ontario. En 2015, la production de textile s'élevait à quelque 3,9 milliards de dollars, employant plus de 17 600 personnes (Industrie Canada, www.ic.gc.ca).

Depuis la mondialisation et les accords commerciaux internationaux, l'industrie canadienne s'est restructurée et s'est tournée vers des produits de niches, en misant sur la rapidité d'exécution, l'adaptabilité et l'amélioration des processus. Les produits textiles à usage commercial représentent une de ces niches, en visant la production de produits résistants pour l'industrie commerciale, l'hôtellerie, la restauration et les services de santé. Les fabricants de textiles commerciaux, par exemple, offrent à leur client des produits standards qu'ils doivent garder en stock et livrer immédiatement selon la demande (*make-to-stock*) et des produits sur mesure (*make-to-order*) avec un certain délai de livraison. La planification de la production doit intégrer les deux types de produits en estimant les besoins en produits standards et en estimant les besoins de matière première pour les produits sur mesure, la matière première ayant un long délai de livraison.

Les étapes pour la production de textiles à usage commercial sont les suivantes : l'ourdissage, le tissage, la finition à sec, la teinture, l'inspection, l'emballage et l'expédition. Certains textiles ne passent pas par l'étape de finition à sec, alors que d'autres ne passent pas par la teinture, selon le type de textile.

L'étape la plus importante, la plus coûteuse et la plus longue est celle du tissage. Une usine de production de textile à usage commercial peut compter sur un grand nombre de métiers à tisser pour l'étape du tissage, de l'ordre d'une centaine. C'est l'étape qui limite habituellement la capacité de production de l'usine (étape goulot). Généralement, une usine cherchera à maximiser le taux d'utilisation de ses métiers à tisser, pour maximiser sa capacité de production. Par contre, par souci de contrôle de ses coûts et en contexte de pénurie de main-d'œuvre, on emploie généralement peu d'employés pour l'opération des métiers à tisser. Ces employés sont responsables de finaliser les mises en course, lancer les tâches de production et réparer les *bris simples* au niveau du tissu (ex. bris de fil de chaine) survenant pendant la production. Le métier s'arrête automatiquement lors du bris, mais l'opérateur doit faire une brève intervention pour relancer la pro-

duction. Puisque chaque opérateur doit s'occuper de plusieurs métiers à tisser à la fois (pour un ratio variant de 5 à une vingtaine de métiers par opérateur) il arrive que plusieurs des bris surviennent en même temps et donc que le métier soit arrêté pour une période plus longue que nécessaire. Ce délai d'attente (temps d'arrêt), réduisant du même coup son taux d'utilisation et a un impact indéniable sur la productivité. C'est ce qui s'appelle l'interférence des équipements (*machine interference* en anglais) (Stecke & Aranson, 1985).

La productivité de l'usine dépendra donc de différents facteurs tels que les temps de mise en course, les taux de panne, les taux de bris des fils de trame et des fils de chaine, du temps de réparation par les opérateurs, mais aussi le temps d'attente avant que l'opérateur se rende à la machine.

Dans un contexte d'amélioration des processus, il est pertinent de s'interroger quant à la pertinence de différents scénarios d'utilisation des opérateurs (appelés ici tisserands) en charge des métiers à tisser. En regard à leur nombre et leur positionnement dans l'usine, il est possible de simuler des plans de production réalistes, des taux de bris simples et la finalisation des mises en course, de façon à comparer le temps d'arrêt des métiers à tisser qui impacte la production globale de l'usine.

Dans cette étude, la simulation à évènements discrets est utilisée. La revue de littérature (Section 2) couvrira l'interférence des machines et l'optimisation des opérations de tissage par la simulation. Par la suite (Section 3), la méthodologie utilisée sera décrite, incluant la collecte de données, le développement du modèle et la validation de ce modèle. La section 4 présentera les expérimentations ainsi que l'analyse des résultats des différentes simulations, suivi d'une conclusion.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'*interférence des équipements* est un concept étudié depuis de nombreuses années. Il s'agit de l'attente indésirable et non nécessaire d'un équipement de production causée par l'assignation d'un (ou plusieurs) opérateur à plusieurs équipements (Stecke & Aranson, 1985). Cette situation d'attente se produit lorsque les demandes de service ne sont pas synchronisées ou planifiée : elles arrivent aléatoirement. Le problème pourrait se régler en assignant un seul équipement par opérateur, mais alors, il en résulterait des coûts salariaux trop importants et des opérateurs avec des très faibles taux d'utilisation. À l'opposé, trop peu d'opérateurs (par exemple, un seul) entrainerait alors un très grand nombre d'équipements en attente de service, diminuant drastiquement le taux d'utilisation de ces équipements. Les entreprises sont constamment à la recherche du meilleur ratio possible d'équipements par opérateur, pour rechercher un équilibre entre les coûts salariaux et le taux d'utilisation des équipements.

Dans le contexte de la production de textile, l'interférence des équipements est un problème fréquent, puisqu'on assigne un certain nombre de métiers à tisser par tisserand. Puisque les bris de fils de trame et de fils de chaine ne sont pas prévisibles, il arrivera des cas où plus d'un bris se produira au même moment sur des métiers à tisser différents, mettant en attente un des métiers pour un plus long moment que nécessaire.

Des chercheurs ont divisé le problème de l'interférence des équipements en différents types, soit déterministes (les temps entre les services sont constants) et probabilistes (les temps entre services ne sont pas constants) (Stecke & Aranson, 1985). Il est aussi possible de diviser les types de problèmes selon le nombre d'équipements et d'opérateurs, soit opérateur unique pour plusieurs équipements ou plusieurs opérateurs pour plusieurs équipements. Pour tous ces cas, un certain nombre de travaux de recherche portent sur la recherche de la meilleure utilisation possible des équipements. Des tables et formules ont été développées pour donner des indications aux industriels, notamment les formules de Wright, celles de Duvall, les tables d'Ashcroft ou de Palm (Baki Engin, 2009). La théorie des files d'attente peut être utile lorsque les taux de service et les taux d'arrivée sont les mêmes pour tous les équipements. Sarkar, Mukhopadhyay & Ghosh (2014) utilisent la théorie des files d'attente pour calculer le nombre optimal d'opérateurs dans une usine de textile en Inde pour réduire le temps total d'arrêt de métiers à tisser identiques.

Malheureusement, pour les modèles mathématiques, tel que ceux issus de la théorie des files d'attente et des tables de calculs, un système de production comme celui composé de métiers à tisser est souvent trop complexe pour prendre en compte les différentes interactions entre les équipements et les opérateurs Tunali (2004), et les variations de facteurs pour chaque équipement, tels que les taux de pannes et les temps de service, ainsi que les temps de transport des opérateurs vers les équipements. La simulation informatique devient alors un outil très utile pour modéliser les interactions et les différents facteurs, et optimiser les processus de production dans un contexte d'interaction des équipements.

Différents auteurs ont utilisé la simulation pour aborder différents problèmes de production de l'industrie du textile. Par exemple, Aldas, Reyes, Morales, Alvarez, Portalanza & Aman (2018) comparent différentes méthodes de contrôle de la production d'un manufacturier de textile, soit les méthodes kanban, CONWIP et DBR (*Drum Buffer Rope*, concept issu de la théorie des contraintes). Ils comparent les méthodes en termes d'en-cours, de temps de cycle et de taux de production pour la production de 100 unités. De leur côté, Crespo, Cossio & Piarpuezan (2018) utilisent la simulation à évènements discrets pour comparer l'utilisation de différents nombres de deux types d'opérateurs de machines de tissage de bas, soit les réparateurs et les tourneurs. Moon, Kang, Jeon et Chun (2016) présentent le développement d'un outil de simulation dans

le but de valider les plans de production pour des métiers à tisser. Mohammed Faisal (2016) présente un modèle de simulation comparant des alternatives de systèmes de production dans une application d'entreprises de cuir et textile. Il compare un système de production traditionnel à un système de production Lean, sur la base du taux de production, des en-cours et du taux d'utilisation des équipements.

Plus particulièrement pour le problème de l'interférence des équipements, Chien, Zheng et Lin (2014) proposent une méthodologie par simulation pour déterminer le nombre optimal d'équipements pour chaque opérateur pour une performance optimale. Ils présentent une application dans un contexte réel d'installations de test de semi-conducteurs. Baki Engin (2009) utilise la simulation dans un contexte d'assignation de plusieurs machines par opérateur, dans l'industrie du textile. Plus particulièrement, il compare des approches de service des opérateurs, soit les services périodiques suivant un certain ordre préétabli et les services aléatoires (il se rend où on a besoin de lui). Dans le cas d'un grand nombre de machines et d'un faible taux d'arrêt, l'approche aléatoire est préférable. Par contre, lorsque le taux d'arrêt atteint un certain niveau, l'approche des services périodiques (unidirectionnel et bidirectionnel) est préférable. L'outil permet de valider ce niveau pour des applications spécifiques.

La présente recherche aborde le problème de l'interférence des équipements dans un niveau de complexité peu présent dans la littérature, soit un parc de 84 métiers à tisser, chacun ayant un taux de bris de fils de chaine et de fil de trame distincts qui dépend du produit tissé. De plus, les taux de services varient en fonction des métiers et de leur positionnement respectif sur le plancher d'usine. Aussi, les plans de production utilisés pour simuler les opérations sont issus d'un cas d'étude réel.

3 MÉTHODOLOGIE

La présente recherche a été effectuée à l'une des usines de tissage de l'entreprise partenaire. À toutes les unes à deux semaines environ, un ordonnancement est réalisé par les planificateurs pour déterminer quel produit sera tissé sur quelle machine en fonction de différentes contraintes (physiques, ressource humaine, configuration des machines, setup des machines à faire, etc.). Lors du tissage, chaque tisserand est responsable de plusieurs machines. À tout moment, des bris de fil de trame ou de fil de chaine peuvent se produire. Les tisserands sont responsables de réparer ces bris et repartir la production du métier à tisser. Lors d'un tel bris, un indicateur lumineux s'active sur la machine, indiquant au tisserand qu'il faut aller réparer le produit. Un problème d'attente supplémentaire se produit lorsque le tisserand est occupé à réparer un bris et qu'une autre machine dont il a la responsabilité est aussi sujette à un bris. Cela mène alors à un temps d'attente avant réparation qui peut parfois être long et un retard pour les de production pour les produits en cours.

Dans cette étude, la simulation à évènements discrets est utilisée pour analyser l'impact du nombre de tisserands sur le temps d'attente avant réparation des métiers à tisser, ainsi que sur le retard occasionné par les bris par rapport au plan de production prévu. L'approche par simulation est largement utilisée (Law and Kelton 2000) et permet de simuler des scénarios parfois couteux ou simplement irréalisable dans la réalité. Un modèle de simulation utilisant le logiciel Simio a été élaboré, présentant le plus fidèlement possible le plancher de production de l'usine partenaire.

La figure 1 présente la modélisation du plancher de production où les produits sont fabriqués.

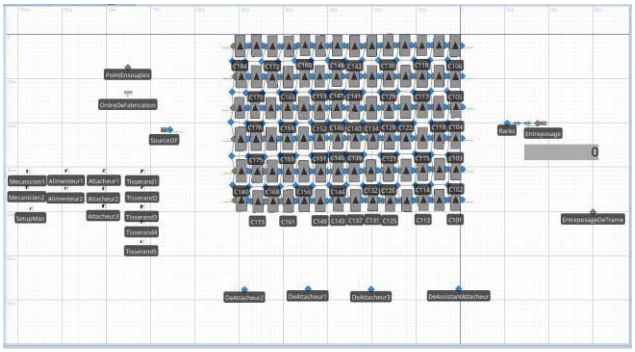


Figure 1 : Modélisation du plancher de production dans le logiciel Simio

Les ordres de fabrication issus de l'ordonnancement des planificateurs sont envoyés sur chaque métier à tisser à la date de début de tissage prévue dans le plan de production. Les dates de début et la durée de tissage prévu sont associées à chaque ordre de fabrication. Le moment et la durée réelle de production seront connus lors de la simulation.

Différents scénarios/simulations seront réalisés afin d'étudier l'impact du nombre de tisserands sur les temps d'attente avant la réparation, sur les retards occasionnés ainsi que sur la productivité en général. De plus, le modèle tient compte de plan d'aménagement de l'usine (incluant les distances entre les machines, la taille des machines, la vitesse de déplacements des tisserands, les chemins possibles empruntés par les tisserands, etc.) ainsi que les paramètres de planification ayant lieu lors du tissage, tel que l'affectation des tisserands aux différents métiers à tisser, le fonctionnement d'un métier à tisser, le nombre de tisserands utilisés ou encore la distribution statistique des pannes qui surviennent.

Le modèle a d'abord été vérifié et validé (Sargent 2013). La période de vérification comprenait entre autres des vérifications avec les experts de l'usine sur les différents processus de production. Concernant la validation, une possibilité pour valider le modèle est d'utiliser les mêmes entrées au modèle que ceux utilisés par l'entreprise dans la réalité, et comparer les mêmes indicateurs de performance. (Sargent 2013). Cette comparaison a été

faite sur le nombre de bris. Deux types de bris sont représentés (casse en trame et casse en chaine). Les casses sont propres au type de produits et peuvent changer d'une machine à l'autre pour un même produit. Chaque type de casse entraine un temps de réparation différent. Un jeu de donnée réelle correspondant à 10 jours de production et utilisant 79 métiers à tisser a été utilisé à cet effet. D'après les experts de l'entreprise, c'est un jeu de données représentatif d'une production typique.

Les taux de casses réels des produits ont été utilisés. Sur la figure 2, une première validation montre que la modélisation des bris est valide puisqu'en utilisant les taux de casse réels de leur ordonnancement de 10 jours, le nombre de pannes simulées est très semblable au nombre de pannes réelles.

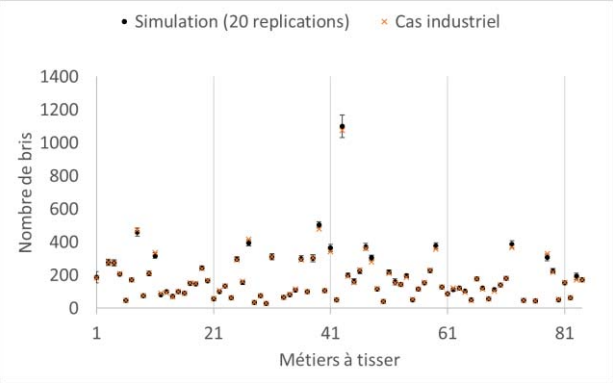


Figure 2 : Comparaison du nombre de bris pour chaque machine entre le réel et la simulation à des fins de vérification

Il est possible de voir le nombre de pannes réelles par machine issue des données de l'entreprise (croix) et le nombre de pannes simulées (points noirs) par machine. Un total de 20 réplications a été utilisé pour obtenir des intervalles de confiance à 95%. Une loi de poisson est utilisée pour générer les bris. Les résultats sont proches, car nous utilisons le taux de bris constaté par heure pour notre distribution. Les temps d'arrêt dus aux bris ont également été comparés et étaient jugés comparables par les experts. Cela a permis de valider non seulement le processus de bris, mais aussi le processus de réparation.

4 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

Une fois le modèle validé, il est possible de tester et analyser différents scénarios d'affectation des tisserands. Dans ces scénarios, les indicateurs de performance utilisés sont le temps d'attente avant réparation le retard engendré par les bris et le taux d'utilisation des tisserands. Le tableau 1 résume les différents scénarios simulés et étudiés.

Scénario	**Nombre de tisserands**	**Positionnement d'attente des tisserands**
A	4	Reste en place après réparation
B (scénario de référence)	5	Reste en place après réparation
C	6	Reste en place après réparation
D	7	Reste en place après réparation
E	79 (un par métier à tisser)	Reste à son métier

Tableau 1 : Tableau d'expérimentations

Le scénario B est le scénario de référence. Il est composé de 5 tisserands, chacun responsable d'un nombre de machines bien précis. C'est ce scénario qui a été réalisé par la compagnie (et qui nous a servi à valider le modèle à la section précédente). Les autres scénarios permettent de faire varier le nombre de tisserands de 4 à 7. Ces nombres ont été suggérés par l'entreprise, estimant que descendre en dessous de 4 amènerait à de très longs temps d'attente, alors que de monter au-dessus de 7 était difficile par manque de main-d'œuvre. À titre comparatif et pour disposer d'une borne supérieure (c.-à-d. pour connaître la meilleure performance possible en termes de baisse des retards et diminution du temps d'attente avant réparation), nous avons simulé un scénario (E) où un tisserand est responsable de chaque machine, attendant un bris pour réparer. Cela peut également être interprété comme la performance qui serait obtenue avec une automatisation totale du processus de tissage.

L'horizon de simulation est de 10 jours. Les résultats qui suivent montrent les performances de l'entreprise selon les différents indicateurs de performance choisis en fonction du nombre de tisserands qui opèrent sur les machines. Le temps de simulation est de 50 secondes pour l'initialisation des données, puis environ 2,6 secondes par réplication. Un total de 50 réplications a été réalisé par scénario pour obtenir des intervalles de confiance à 95%.

La figure 3 montre le temps d'arrêt total des machines comparées au temps de tissage. En abscisse, le nombre de tisserands est représenté. En ordonnée, le temps converti en pourcentage, est représenté. Le temps a été converti en pourcentage par soucis de confidentialité. Il est possible de constater que le temps de fabrication (temps de tissage, en gri foncé) ne varie pas d'un scénario à l'autre. En effet, quelle que soit la réplication, ce temps reste fixé par la table de données qui indiquent le temps de tissage sans les bris. En gris clair, il s'agit du temps de réparation,c'est-à-dire du temps mis à partir du moment où un tisserand débute une réparation jusqu'à sa fin. Ce temps n'est pas sujet aux aléas et est constant, bien qu'il varie dépendamment du type de réparation à effectuer (bris en chaine ou en trame). Il ne peut être compressé. Il représente 5% du temps de tissage. En blanc, il s'agit du temps d'attente avant réparation. Dans le scénario E, ce temps correspond à une valeur nulle, puisqu'il n'y a jamais d'attente.

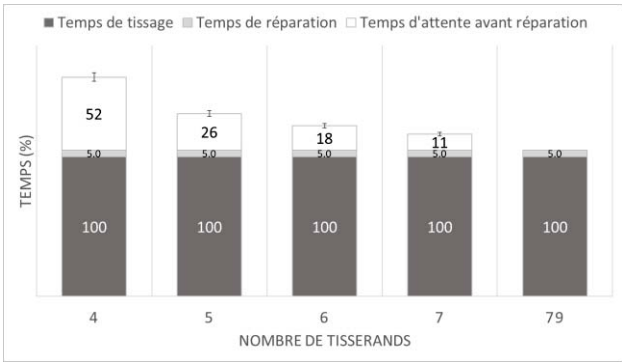


Figure 3 : Temps d'arrêt total en pourcentage pour l'ensemble des machines comparé au temps de tissage en fonction du nombre de tisserands

Globalement, on note une amélioration attendue à l'ajout de chaque tisserand. Le passage de 4 à 5 tisserands présente le meilleur gain et que le gain décroit ensuite exponentiellement au fur et à mesure qu'on ajoute des tisserands. De plus, il est pertinent de noter le rapport entre le temps d'attente avant une réparation, versus le temps de tissage. Par exemple, pour le scénario à 4 tisserands, le temps d'attente représente plus 50 % du temps de tissage. Puisqu'il y a de nombreux bris (plus de 13000 bris en seulement 10 jours pour 79 machines utilisées), il est devient important de pouvoir quantifier ce temps d'attente et de montrer l'évolution de celui-ci lorsqu'on ajoute un tisserand.

La figure 4 montre le temps d'arrêt moyen par machine par bris, selon le nombre de tisserands utilisés. Comme précédemment, on note une nette amélioration entre le scénario à 4 et 5 tisserands. Le scénario de base à 5 tisserands montre un temps d'arrêt de 9 minutes, dont un temps d'attente avant réparation de 7,9 minutes. Ceci signifie qu'à chaque bris, il faut en moyenne 7,9 minutes au tisserand pour se rendre à la machine.

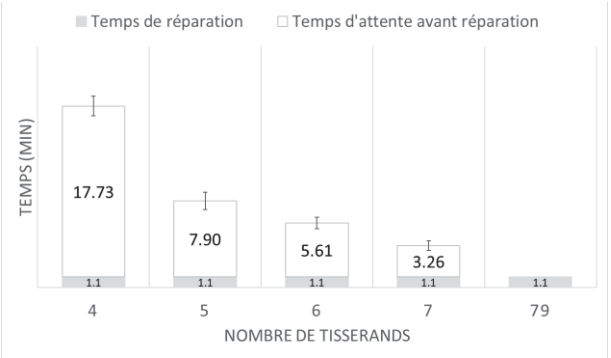


Figure 4 : Temps d'arrêt moyen en minutes par machine en fonction du nombre de tisserands

À la figure 5, le taux d'utilisation moyen d'un tisserand concernant la réparation des bris a été mis en relation avec les résultats précédents. On constate un taux d'utilisation (gris foncé) allant en décroissant. En effet, plus on augmente le nombre de tisserands, plus le pourcentage de leur tâche consacré à la réparation diminue, car ils ont de moins en moins de machines à gérer. Le tisserand n'est pas nécessairement en attente, puisqu'il peut réaliser des tâches connexes ou de préparation. Il est alors pertinent de mettre en relation les résultats des figures 3, 4 et 5. Un gestionnaire pourrait conclure avec la figure 5 que le pourcentage de temps moyen consacré à la réparation dans le scénario de base à 5 tisserands (scénario B) est trop bas et que de passer à 4 tisserands serait raisonnable. Seulement, l'impact sur le temps d'arrêt des métiers à tisser serait majeur, pour un passage de 17,73 minutes d'attentes par bris à 7,90 minutes (Figure 4).

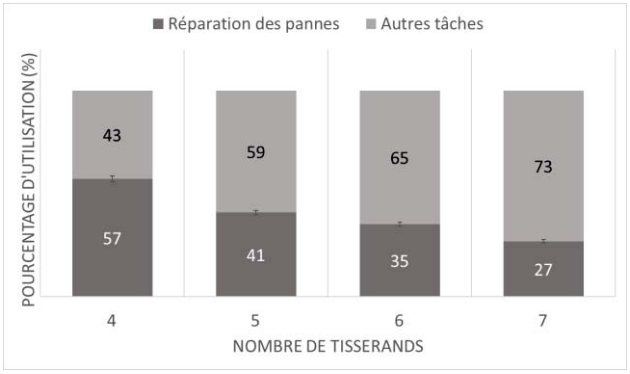


Figure 5 : Taux d'utilisation moyen (%) des tisserands pour chaque scénario

Finalement, la figure 6 présente le « retard » en heures cumulé sur tout l'horizon de simulation pour l'ordre de fabrication le plus tardif. En gris clair, on observe la part du « retard » qui est retard directement imputable aux temps de réparation. Il n'est donc pas compressible et ne peut être amélioré que par de la recherche ou de la formation de tisserands. En blanc, il s'agit du temps causé par les temps d'attente avant réparation. C'est ce temps qu'il est possible de réduire en ajoutant un ou plusieurs tisserands sur le plancher de production. Il est à noter que plus la simulation avance, plus le retard cumulé augmente, pour finalement atteindre un retard maximal de 133,49 heures pour un ordre de fabrication, en seulement 10 jours de production.

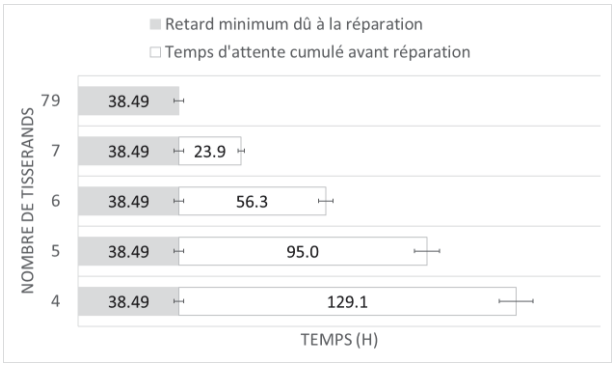


Figure 6 : Retard en heures cumulé sur tout l'horizon de simulation pour l'ordre de fabrication le plus tardif pour chaque scénario

5 CONCLUSION

Dans cette étude, un modèle de simulation a été élaboré et modélise fidèlement la salle de tissage d'une entreprise partenaire. Ce modèle a été vérifié et validé au moyen de donnée historique fournie par l'entreprise. En utilisant ces données, il a été possible de réaliser une étude d'utilisation des tisserands en termes de nombre et de positionnement. Plus particulièrement, en utilisant cet outil, il a été montré que la durée du temps d'arrêt des métiers à tisser (temps de réparation et temps d'attente de réparation due à un bris) est grandement impactée par le nombre de tisserands disponible sur le plancher. Des scénarios faisant varier le nombre de tisserands dans les mêmes conditions d'utilisation que celles qui se sont déroulées dans l'usine ont été testés et analysés. Bien qu'il apparaisse logique de dire que plus le nombre de tisserands augmente, meilleures sont les performances en termes de minimisation des retards et du temps d'arrêt des machines, cet outil de simulation permet de chiffrer l'ajout ou le retrait d'un ou plusieurs tisserands. Il est notamment possible pour un gestionnaire de conclure que le temps moyen d'arrêt des métiers à tisser dans le scénario à 4 tisserands (scénario A) est trop élevé et que de passer à 5 tisserands ou 6 tisserands serait préférable. Alors, une étude économique serait pertinente pour comparer le coût d'un tisserand supplémentaire et la production supplémentaire effectuée pour une période donnée. Il s'agit donc pour l'entreprise de choisir le nombre de tisserands optimal qui minimiserait ce temps d'arrêt, tout en restant profitable.

Finalement, l'outil de simulation pourrait aussi être utilisé pour réaliser d'autres analyses comme par exemple simuler un remplacement de machines plus récentes ayant de meilleures performances et ainsi justifier un investissement, en fonction de l'augmentation de la productivité.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier l'entreprise partenaire Duvaltex pour son soutien dans ces travaux.

RÉFÉRENCES

Haque, L., & Armstrong, M. J. (2007). A survey of the machine interference problem. *European Journal of Operational Research*, *179*(2), 469-482.

Stecke, K. E., & Aronson, J. E. (1985). Review of operator/machine interference models. *International Journal of Production Research*, *23*(1), 129-151.

Chien, C. F., Zheng, J. N., & Lin, Y. J. (2014). Determining the operator-machine assignment for machine interference problem and an empirical study in semiconductor test facility. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *25*(5), 899-911.

Engin, A. B. (2009). Comparative analysis for periodical and random servicing systems considering different working circumstances: A textile application. *Journal of manufacturing systems*, *28*(4), 89-97.

Aldás, D. S., Reyes, J. P., Morales, L. A., Álvarez, K. M., Portalanza, N. D. J., & Amán, R. J. (2018, October). Manufacturing strategies for an optimal pull-type production control system. case study in a textile industry. *Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)* (pp. 1-6). IEEE.

Orozco Crespo, E., Sablon Cossio, N. & Saraguro Piarpuezan, R.V. (2018) Discrete event simulation for resource programming: case of Ecuadorian textile industry. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Paris, France, 26-27 juillet 2018

Moon, S., Kang, S., Jeon, J., & Chun, I. (2016, May). Simulation modeling of sewing process for evaluation of production schedule in smart factory. In *2016 International conference on industrial engineering, management science and application (ICIMSA)* (pp. 1-3). IEEE.

Faisal, A. M. (2016, March). Simulation Modeling and Analysis of Labour-intensive Small and Medium-sized Enterprises for choosing the best alternative production system. In *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)* (pp. 3564-3566). IEEE.

Tunali, S. (2004). A simulation-based scheduling system for a textile plant. *International journal of computer applications in technology*, *19*(2), 119-124.

Sarkar, A., Mukhopadhyay, A. R., & Ghosh, S. K. (2015). Productivity improvement by reduction of idle time through application of queuing theory. *Opsearch*, *52*(2), 195-211.

Law, A. M., Kelton, W. D., & Kelton, W. D. (2000). *Simulation modeling and analysis* (Vol. 3). New York: McGraw-Hill.

Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of simulation*, *7*(1), 12-24.

13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'20 – 12 au 14 novembre 2020 - Agadir – Maroc « Nouvelles avancées et défis pour des industries durables et avisées »

IMPACT D'UNE EXPRESSION DE PERFORMANCE ELEMENTAIRE SUR L'EXPRESSION DE PERFORMANCE AGREGEE : UNE APPROCHE PAR L'INTEGRALE DE CHOQUET

L. BERRAH, V. CLIVILLE, H. VERJUS

LISTIC Université Savoie Mont-Blanc
74944 Annecy le Vieux Cedex - France
vincent.cliville@univ-savoie.fr, lamia.berrah@univ-savoie.fr, herve.verjus@univ-savoie.fr

R. GANDIA

IREGE Université Savoie Mont-Blanc
74944 Annecy le Vieux Cedex - France
romain.gandia@univ-savoie.fr

RESUME : *Cet article traite de la notion d'impact d'une expression de performance élémentaire sur une expression de performance globale, sachant une relation d'agrégation entre les deux expressions. Lorsque l'agrégation est fondée sur un opérateur mathématique tel que la moyenne pondérée, le calcul de cet impact est immédiat. Il n'en est pas de même pour des agrégations fondées sur des opérateurs plus complexes, lesquels, en l'occurrence, considèrent non seulement les poids mais aussi les interactions entre les expressions élémentaires. Partant d'un modèle d'agrégation par l'Intégrale de Choquet (IC), nous cherchons dans cette étude à définir cet impact. Quantifié sur l'univers de discours de l'expression agrégée, l'impact prend en compte la valeur de l'expression élémentaire considérée ainsi que ses liens avec les autres expressions impliquées dans l'agrégation. Après un bref rappel de l'évolution des SIP (Systèmes d'Indicateurs de Performance) en milieu industriel, une description des fondamentaux de l'agrégation par l'IC est présentée. La définition de l'impact est alors argumentée et formalisée. La proposition est illustrée à partir d'une exploitation d'un modèle d'agrégation précédemment développé chez un partenaire industriel, leader mondial de l'automation. Des perspectives concluront finalement cette étude.*

MOTS-CLES : *Systèmes d'Indicateurs de Performance (SIP), Agrégation, Intégrale de Choquet (IC), Impact.*

1 INTRODUCTION

Un Indicateur de Performance (IP) identifie l'association d'un objectif, d'une mesure et d'un critère. Il est l'outil qui établit le lien entre l'objectif (état espéré associé au critère), la mesure (état atteint) et l'action menée dans ce sens (Berrah et al., 2018). L'IP fournit alors ladite expression de performance qui renseigne le pilotage de la satisfaction liée à l'atteinte de l'objectif. Cette expression s'est vue totalement changer de paradigme pour les systèmes industriels. Son mode de calcul a évolué d'un modèle simplifié, additif et monocritère vers un modèle complexe, systémique et multicritère. En effet, à l'ère du Taylorisme (entreprise 2.0), des IP productivistes, basés sur le critère Coût, avaient été définis, conformément à la pyramide de Dupont de Nemours (Johnson, 1975). L'expression de la performance globale, *i.e.* celle de l'ensemble du système industriel, se calculait sur le principe d'une somme des expressions élémentaires, retournées par les IP associés aux postes les plus élémentaires du système. Les informations retournées par les IP avaient pour vocation le contrôle de l'atteinte des objectifs de productivité. L'impact de chaque expression élémentaire était obtenu par simple opération de *ratio*. Quasi-redondant avec l'expression associée, cet impact permettait l'analyse de l'efficience du moyen (homme et équipement) utilisé. Quant à l'expression globale, elle donnait lieu à des recherches d'optimisation de l'enveloppe budgétaire globale.

Avec l'Industrie 3.0 (Bitteau and Bitteau, 1998), la définition des IP s'est progressivement élargie aux critères de Qualité et de Délai, induisant des interactions entre les IP associés. L'expression de la performance industrielle devint ainsi fondée sur le fameux triptyque C-Q-D (Ducq et al., 2001). Des méthodologies de définition de tableaux de bord ont été proposées, telles le *Balanced ScoreCard* (BSC) (Kaplan and Norton, 2001). Plus généralement, la notion de Système d'Indicateurs de Performance (SIP) (*Performance Measurement Systems* (PMS)) (Neely, 2005) (Nudurupati et al., 2011) était née, pour la prise en compte de la dimension multicritère de l'expression de la performance. Les SIP prônaient une prise en compte « intégrée » des différents IP et devenaient un outil d'aide au pilotage. Réactif, ce pilotage allait ainsi au-delà du contrôle taylorien. L'expression de la performance globale se calculait à partir de l'agrégation des expressions élémentaires associées aux IP impliqués (Globerson, 1985) (Bititci et al., 2001) (Clivillé et al., 2007) (Lauras et al., 2010). Le modèle additif a alors laissé place à des modèles de compromis, induisant des questions de décomposition d'objectif et de choix d'opérateur d'agrégation. Des contraintes de commensurabilité du fait de la nature différente des critères ont été également à prendre en compte. La part de chaque critère dans les résultats globaux ainsi que les interactions avec les autres critères étaient dans ce cas moins simples à déduire que dans le cas additif. L'analyse reposait essentiellement sur des explications *a posteriori* fournies par des données extérieures au SIP. Le pilotage disposait alors d'une vue synthétique (par l'expression

agrégée) et de vues locales (par les expressions élémentaires) de la performance du système industriel considéré ; avec une possible caractérisation des liens entre elles. En effet, depuis une vingtaine d'années, des modèles fondés sur l'Intégrale de Choquet (IC) (Labreuche and Grabisch, 2003) ont été proposés (Clivillé et al., 2007) (Shah et al., 2016). Opérateur de la famille des moyennes, l'IC offre la possibilité de réaliser une agrégation des expressions de performance sur la base d'une prise en compte des liens entre celles-ci, à savoir des importances et des interactions. Cet opérateur de moyenne généralisée peut en particulier se décliner selon son paramétrage comme une moyenne pondérée, un opérateur *min*, un opérateur *max*, l'opérateur *Ordered Weighted Average* (OWA) selon son paramétrage. Une quantification des expressions élémentaires et de l'expression agrégée résulte du mécanisme. Un modèle explicatif des résultats atteints est ainsi fourni au pilotage (Berrah 2019). La cohérence du mécanisme utilisé est garantie grâce à des méthodologies proposées par l'école de la prise de décision multicritère (*MultiCriteria Decision Aiding* MCDA), telles que, pour celles connues en milieu industriel, MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TecHnique*) (Bana e Costa et al., 2012) ou AHP (*Analytic Hierachy Process*) (Saaty, 1977).

Plus tard, des politiques d'industrialisation fondées sur des notions comme le Développement Durable (DD) (Sikdar, 2003), la Responsabilité Sociale et Environnementale (RSE) (ISO 26000) ou l'économie circulaire (Rossa et al., 2019) ont vu le jour, introduisant des critères tels que ceux liés à l'environnement, la sécurité ou le bien-être humain. Aujourd'hui, à l'ère de l'Industrie 4.0, les critères précédents demeurent (Dalenogare et al., 2018) et s'étendent à des critères traitant de cette introduction du numérique (Atik and Ünlü, 2019) (Büchi et al., 2020). La question des liens prend d'autant plus d'importance en la présence de critères « complexes ». Ces derniers couvrent l'ensemble du système industriel, et ce, dans toutes les étapes de son cycle de vie ; avec une décomposition qui n'obéit pas aux règles hiérarchiques classiques. L'innovation (Arnold and Voigt, 2016) (Frank et al., 2019) (Müller et al., 2018) en est un bon exemple. Revenue en force dans les mécanismes de transformation digitale vécus actuellement par les systèmes industriels (Reischauer, 2018), la préoccupation d'intégrer l'innovation dans les tableaux de bord n'est toutefois pas récente (Kueng, 2000). Mais sa portée dépasse le système industriel et ses interactions avec les critères qui y sont impliqués sont difficilement identifiables.

S'inscrivant plus particulièrement dans la continuité des modèles d'agrégation basés sur l'IC, nous proposons dans cet article d'enrichir les informations données par le modèle d'agrégation au pilotage, par une information supplémentaire : l'impact d'une expression de performance élémentaire sur l'expression agrégée. L'idée est de chercher à retrouver dans l'expression de la performance agrégée l'influence de chacune des expressions de performance élémentaires. La notion d'impact offre en effet plusieurs avantages. Elle présente l'intérêt d'une information explicite et directement exploitable pour le pilotage. Elle permet également, dans un modèle qui se veut compensatoire, de faire ressortir clairement la part de chaque IP dans le SIP global.

L'objectif de cet article est donc l'introduction de la notion d'impact dans un modèle d'agrégation. Pour ce faire, un retour sur l'agrégation dans la performance industrielle par l'IC est effectué dans un premier temps. Par la suite, une exploitation de ce modèle pour la proposition de quantification de la notion d'impact est introduite. En guise d'application, une agrégation menée précédemment chez un partenaire industriel est considérée. Enfin, des perspectives à cette réflexion concluront ce travail.

2 L'AGREGATION PAR L'IC

2.1 Généralités sur l'agrégation

De manière générale, l'agrégation, qualifiée d'approche à critère unique de synthèse, « *consiste à prendre appui sur une règle apportant une réponse synthétique exhaustive et définitive au problème de l'agrégation des performances. Elle prend la forme d'un critère unique de synthèse agrégeant les n critères de la famille par le biais d'une fonction d'agrégation.* » (Roy, 1993).

L'agrégation peut être formalisée par la fonction :

$$\begin{aligned} &Ag: \quad E_1 \times E_2 \times ... E_i \times ... E_n \times \rightarrow E \\ &(p_1 ... p_i ... p_n) \rightarrow p_{Ag} = Ag(p_1 ... p_i ... p_n) \end{aligned} \quad (1)$$

où chaque expression de performance élémentaire p_i $i = 1$ à n est définie sur un univers de discours E_i et l'expression de la performance agrégée p_{Ag} est définie sur l'univers de discours E (Berrah et al., 2011).

Le mécanisme d'agrégation doit respecter des conditions établies dans la théorie du mesurage, en particulier la commensurabilité des p_i et la signifiance de l'opérateur d'agrégation vis-à-vis de ces expressions (Krantz et al., 1971). Deux expressions de performance élémentaires p_i et p_j sont commensurables si l'égalité $p_i = p_j$ implique qu'elles réalisent un même degré d'atteinte de l'objectif auquel elles se rattachent. En l'occurrence, la normalisation des p_i sur des intervalles $[0,1]$ garantit la commensurabilité de ces expressions pour $p_i = p_j = 0$ et pour $p_i = p_j = 1$. Par ailleurs, un opérateur d'agrégation est signifiant pour un ensemble p_i si les opérations mathématiques exécutées ont un sens. Par exemple, il n'y a pas de sens à additionner le rang des p_i comme peut le faire la méthode de Borda[1]. Par contre, il y a un sens à

Code de champ modifié

[1].http://gerardgreco.free.fr/IMG/pdf/MA_c_moire-Borda-1781.pdf

additionner des p_i définies suivant des échelles d'intervalle[2].
Garantir ces conditions mène à l'utilisation d'une procédure qui permet de définir dans un cadre mathématiquement fondé, des p_i commensurables d'une part et les paramètres de l'opérateur d'agrégation signifiant d'autre part (Grabisch et al., 2011). Bon nombre de méthodes d'aide à la décision multicritère ont été introduites pour ce faire. La méthode MACBETH en fait partie.

2.2 Procédure MACBETH pour l'agrégation

Le choix de MACBETH permet d'identifier de façon cohérente les paramètres de l'IC conformément aux exigences de commensurabilité et de signifiance de la théorie du mesurage (Fishburn 2001). Apparue dans les années 1990, MACBETH reprend la philosophie de la méthode AHP dans le principe d'identifier, par expertise, les informations requises pour réaliser l'agrégation. La collecte de l'expertise se fait sous forme d'identification des « préférences » du pilote relativement à des « situations » prédéfinies. Ces situations véhiculent une connaissance que le pilote a de son système. Elles peuvent être décrites par les vecteurs $(p_1 \ldots p_i \ldots p_n)$. A l'issue d'un questionnement du pilote quant à ses préférences par rapport aux situations considérées, un système de relations (équations et inéquations) est obtenu. La résolution de ce système permet de :

- quantifier les p_i. Ces p_i seront définies selon des échelles d'intervalle, ce qui garantit leur commensurabilité (Bana e Costa and Vansnick, 1997) ; les échelles sont bornées par deux valeurs : la borne inférieure pour laquelle $p_i = 0$ correspond à une satisfaction nulle par rapport à l'atteinte de l'objectif, et la borne supérieure pour laquelle $p_i = 1$ correspond à une satisfaction totale par rapport à l'atteinte de l'objectif ;
- quantifier les liens entre p_i et p_{Ag} selon l'opérateur retenu. MACBETH retient généralement la moyenne pondérée (*Weighted Arithmetic Mean* WAM) pour sa simplicité d'usage ou l'IC pour sa richesse en informations, chacun des deux opérateurs étant signifiant pour des p_i définies selon des échelles d'intervalle (Clivillé et al., 2007), (Mayag et al., 2011) ;
- calculer p_{Ag}.

Le lecteur pourra se reporter à (Bana e Costa et al., 2012) et (Clivillé et al. , 2007) pour de plus amples détails concernant ces deux étapes ; le propos de cet article étant sur un autre point. Le paragraphe ci-dessous traite de la seule dernière étape de calcul de l'expression agrégée p_{Ag} .

[2] Les échelle de température Celsius et Fahrenheit sont des échelles d'intervalle. Pour ces échelles, la différence a un sens : $p_i - p_j = p_l - p_k$ ou $p_i - p_j < p_l - p_k$ ou $p_i - p_j > p_l - p_k$.

2.3 L'Intégrale de Choquet (IC) 2-additive

L'IC est un opérateur d'agrégation de $[0,1]^n \to [0,1]$ où n correspond au nombre de p_i $i = 1$ à n. Généralement, ce sont les interactions 2 à 2 des paires (p_i, p_j) qui sont considérées, les autres interactions étant négligeables. L'IC 2-additive (Grabisch, 1996) (Marichal, 2005) peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$p_{Ag} = \sum_{i=1}^{n} p_i v_i - \frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{n} |p_i - p_j| I_{ij} \qquad (2)$$

avec $\left(v_i - \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} I_{ij}\right) \geq 0$ pour assurer la monotonie.
L'indice de Shapley v_i donne l'importance relative de p_i par rapport aux autres p_j avec $\left(\sum_{i=1}^{n} v_i = 1\right)$.
Les coefficients d'interaction I_{ij} corrigent l'importance de (p_i, p_j) selon la différence $|p_i - p_j|$. Quand I_{ij} est positif (respectivement négatif), il réduit p_{Ag} (respectivement l'augmente).

Exemple (1)

Afin de comprendre le principe de calcul par l'IC, considérons l'exemple d'un vecteur d'expressions élémentaires (p_1, p_2, p_3). Imaginons alors les valeurs suivantes : $p_1 = 0,32$, $p_2 = 0,72$ et $p_3 = 0,80$. Supposons les paramètres (identifiés par expertise) suivants (Tableau 1).

Indices de Shapley	v_1	v_2	v_3
	0,5	0,3	0,2
Coefficients d'Interaction	I_{12}	I_{13}	I_{23}
	0,4	0,2	0,2

Tableau 1 : Exemple de paramètres de l'IC

Le calcul de p_{Ag} donne :

$$\begin{aligned} p_{Ag} &= 0,32 \times 0,5 + 0,72 \times 0,3 + 0,80 \times 0,2 \\ &- \frac{1}{2} \times |0,32 - 0,72| \times 0,4 - \frac{1}{2} \times |0,32 - 0,80| \times 0,2 \\ &- \frac{1}{2} \times |0,72 - 0,80| \times 0,2 = 0,400 \end{aligned} \qquad (3)$$

3 PROPOSITION DE DEFINITION DE L'IMPACT DE p_i SUR p_{Ag}

3.1 La notion d'impact

Un modèle d'agrégation fondé sur l'IC fournit au pilotage trois sortes d'information : p_i $i=1$ à n, p_{Ag} et la paire ν_i et I_{ij}. Les deux types d'expressions de performance sont tous deux nécessaires et complémentaires pour agir localement (grâce à p_i) et conserver une vision globale (grâce à p_{Ag}). Les indices de Shapley et les coefficients d'interaction contiennent la connaissance sur la part de l'action locale à l'expression globale. Il demeure malgré tout une difficulté, de par la complexité de l'IC, dans la lecture de ce lien fait entre p_i (et par conséquent les actions menées pour atteindre l'objectif associé) et p_{Ag}. Le pilotage comprend p_i (par exemple $p_1 = 0,32$). Il lui est en revanche implicitement demandé de construire mentalement la part de cette valeur sur p_{Ag} (par exemple $p_{Ag} = 0,40$), sachant son importance relative ($\nu_1 = 0,5$) et ses interactions avec les autres p_j ($I_{12} = 0,4$ et $I_{13} = 0,2$).

Pour pallier cette difficulté, la notion de « contribution » de l'amélioration d'une expression élémentaire à l'amélioration de l'expression globale a été proposée (Berrah et al., 2019). S'inscrivant dans le cadre dynamique des démarches d'amélioration, cette contribution a cherché à répondre à la question : *quel effet l'amélioration d'une* p_i *aura sur l'amélioration de* p_{Ag} *?* L'idée portée par l'impact est similaire, cherchant à répondre, pour sa part, à la question : *quelle part prend* p_i *dans* p_{Ag} *?*

Le terme impact a pour avantage une sémantique claire et un usage régulier en pilotage industriel. De manière générale, ce terme résonne avec les termes influence, effet, conséquence, dans une vision explicative d'un phénomène, d'un état, ici en l'occurrence l'expression de la performance globale du système industriel considéré. Il s'en distinguerait selon nous par la quantification implicite qu'il pourrait porter. Il s'agit en effet de préciser, de mesurer une influence, d'en connaitre la valeur et de la comparer à celle des autres expressions élémentaires.

Dans cette volonté de quantification, notre vision est de penser cet impact, dans le même univers que celui de l'expression de la performance globale, d'une manière la plus simple possible. Le résultat intuitif corollaire à cette hypothèse est que l'expression de la performance globale devient la somme des impacts des expressions de performances élémentaires. La complexité de la prise en compte des interactions et importances sera ainsi encapsulée dans cette quantification. L'impact devient une information « intégrée » et unique qui fournit au pilotage la part prise par p_i dans p_{Ag}.

3.2 Le calcul de l'impact

Comment calculer l'impact d'une expression élémentaire Imp_p_i sur p_{Ag}, sachant un modèle d'agrégation fondé sur l'IC et la contrainte d'un résultat défini sur l'univers de discours de p_{Ag} (pour que la somme de tous les impacts corresponde à p_{Ag}) ?

Pour un modèle d'agrégation fondé sur la WAM,

$$p_{Ag} = \sum_{i=1}^{n} w_i \times p_i . \quad (4)$$

le calcul de l'impact est immédiat. Imp_p_i ne dépend que de p_i et de w_i, poids de p_i dans p_{Ag} :

La propriété d'additivité des impacts nous ramène à la formule d'agrégation par la WAM. L'impact est une pondération de l'expression élémentaire.

$$Imp_p_i = w_i \times p_i . \quad (5)$$

our un modèle fondé sur l'IC, l'idée restera la même, à savoir la prise en compte de tous les termes de l'agrégation qui font intervenir p_i. Par conséquent, conformément à (2) :

$$Imp_p_i = p_i \nu_i - \frac{1}{4} \sum_{i=i,\, j=1}^{n} |p_i - p_j| I_{ij} . \quad (6)$$

Le $\frac{1}{4}$ s'explique par le caractère mutuel des interactions.

(2) peut s'écrire alors sous la forme :

$$p_{Ag} = \sum_{i=1}^{n} Imp_p_i . \quad (7)$$

Notons qu'il est également possible de calculer l'impact d'un sous-ensemble de p_i. En utilisant la propriété d'additivité, dans le cas de l'impact de $\{p_i p_j\}$:

$$\begin{aligned} Imp_\{p_i p_j\} &= Imp_p_i + Imp_p_j = \\ & p_i \nu_i + p_j \nu_j - \frac{1}{2} |p_i - p_j| I_{ij} - \frac{1}{4} \sum_{i=i,k\neq j,k=1}^{n} |p_i - p_k| I_{ik} \\ & - \frac{1}{4} \sum_{j=i,k\neq i,k=1}^{n} |p_j - p_k| I_{jk} . \end{aligned} \quad (8)$$

Exemple (2)

Pour l'illustration, considérons à nouveau l'exemple précédent. Conformément à (6), le calcul de Imp_p_i donne :

$$Imp_p_1 = p_1 \nu_1 - \frac{1}{4} \left(|p_1 - p_2| I_{12} + |p_1 - p_3| I_{13} \right) = 0,096 .$$

Imp_p_1 est faible car la part de p_1 est de $p_1 v_1 = 0{,}160$. Interviennent également I_{12} et I_{13} qui diminuent cette part de $\frac{1}{4}\left(|p_1 - p_2| I_{12} + |p_1 - p_3| I_{13}\right) = 0{,}054$. La figure 1 illustre ces résultats.

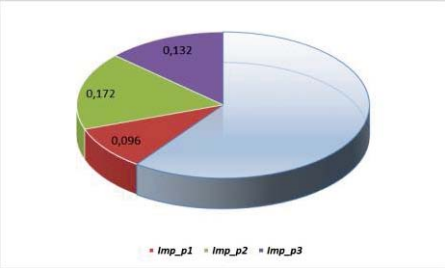


Figure 1 : L'impact des p_i sur p_{Ag}

Les impacts Imp_p_2 et Imp_p_3 sont calculés de la même façon. On a alors :

$p_{Ag} = \sum_{i=1}^{n} Imp_p_i = 0{,}096 + 0{,}172 + 0{,}132 = 0{,}400$,

et $Imp_\{p_1 p_2\} = 0{,}096 + 0{,}172 = 0{,}268$.

4 APPLICATION

4.1 Présentation

Adaptant son mode de pilotage aux préceptes du *Lean Manufacturing*, la Société R. B., leader mondial dans le domaine de l'automation, s'est dotée, il y a une dizaine d'années, d'un ensemble de méthodes et outils pour augmenter la réactivité de son pilotage. En particulier, le SIP mis en place autour de la production a été enrichi d'un modèle d'agrégation (de la performance) fondé sur l'IC (Berrah 2011). Les informations retournées permettaient d'une part, une vision globale des résultats atteints et d'autre part, une explication de ces résultats. Plus tard, avec l'avènement du management visuel, l'idée fut de transformer les résultats numériques en symboles faciles à interpréter (Berrah 2018). Il n'en restait pas moins que les explications fournies par le modèle *via* les indices de Shapley et les coefficients d'interaction demeuraient complexes, ce qui biaisait l'analyse en se focalisant sur les seules valeurs des expressions de performance.

Le modèle d'agrégation défini a mis en avant les liens entre les différents IP impliqués. Pour sa représentativité de la production et la criticité de son pilotage, notamment en matière de délai, la ligne de production de Vérins Hydrauliques (ligne VH) a été retenue. L'objectif (global) associé au *Temps de traversée* a été associé à quatre IP, conformément à la figure 2 et au tableau 2.

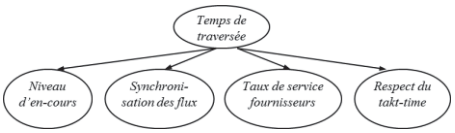


Figure 2 : La décomposition des objectifs de la ligne VH

	Niveau d'en-cours	*Synchronisation des flux*	*Taux de service des fournisseurs*	*Respect du takt-time*
Valeur de l'objectif	1 jour	0 jour	100%	1 heure

Tableau 2 : La valeur des objectifs

Le tableau 3 regroupe les paramètres de l'IC tels qu'ils avaient été obtenus (conformément à la procédure MACBETH § 2.2).

Indices de Shapley	v_1	v_2	v_3	v_4
	0,140	0,390	0,220	0,250
Coefficients d'Interaction		I_{12}	I_{13}	I_{14}
		0,107	0,071	0,071
		I_{23}	I_{24}	I_{34}
		0	0,143	0,214

Tableau 3 : Les paramètres de l'IC pour la ligne VH

Les expressions de performance obtenues (par (2)) sont : $p_1 = 0{,}330$ $p_2 = 0{,}400$ $p_3 = 0{,}580$ $p_4 = 0{,}150$ et $p_{Ag} = 0{,}284$.

Voyons comment la notion d'impact peut expliquer ces résultats.

4.2 Diagnostic à l'aide de l'impact

L'impact associé à chaque p_i est obtenu par l'application de (6) et illustré dans la figure 3. En l'occurrence :

$$Imp_p_1 = p_1 v_1 - \frac{1}{4}\left(|p_1 - p_2| I_{12} + |p_1 - p_3| I_{13} + |p_1 - p_4| I_{14}\right) = 0{,}037$$

De la même façon :

$Imp_p_2 = 0{,}145,\ Imp_p_3 = 0{,}100,\ Imp_p_4 = 0{,}002$

.

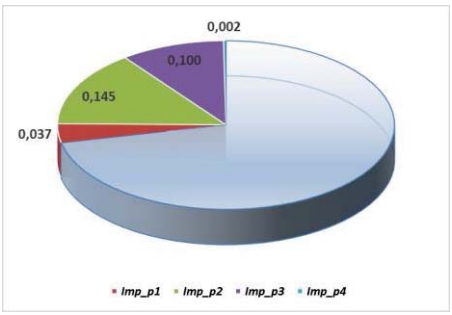


Figure 3 : Les Imp_p_i de la ligne VH.

Ainsi, la valeur atteinte pour l'expression de la performance globale de la ligne VH vient essentiellement de Imp_p_2 et de Imp_p_3. Imp_p_1 est très faible et Imp_p_4 est quasi-nul. Pour le pilotage, cette explication établie à partir des Imp_p_i conduit à cibler l'amélioration sur le *Niveau d'en-cours* et le *Respect du takt-time*. Alors que le diagnostic établi à partir des seules p_i conduit à cibler en priorité l'amélioration du seul *Respect du takt-time.*

Le tableau 4 regroupe p_i et Imp_p_i.

Expression de performance élémentaire	p_1	p_2	p_3	p_4
	0,330	0,400	0,580	0,150
Impact de l'expression de performance élémentaire	Imp_p_1	Imp_p_2	Imp_p_3	Imp_p_4
	0,037	0,145	0,100	0,002

Tableau 4 : Les p_i et Imp_p_i de la ligne VH

On peut voir dans ce tableau que l'expression de performance élémentaire la plus haute $p_3 = 0,58$ ne donne pas l'impact le plus grand, et que p_1 et p_2 qui sont assez proches ont des impacts très différents.

Par ailleurs, considérons une amélioration régulièrement menée par l'entreprise et qui cible le *Niveau d'en-cours* p_1 et le *Respect du takt-time* p_4. Il s'agit de diminuer les arrêts de production en formant les opérateurs à la gestion des micro-arrêts. Les p_i atteintes sont alors : $p_1 = 0,550$ $p_2 = 0,400$ $p_3 = 0,580$ $p_4 = 0,650$. Le nouveau calcul d'impact est illustré figure 4.

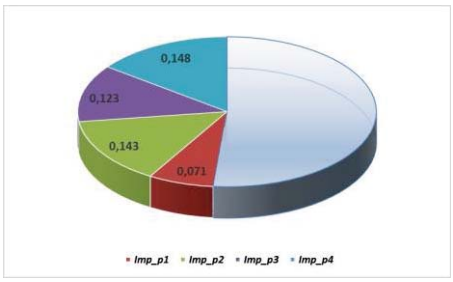


Figure 4 : Les Imp_p_i après amélioration.

Cette fois Imp_p_2, Imp_p_3 et Imp_p_4 sont assez équilibrés, Imp_p_1 reste moins élevé, principalement en raison de son importance moyenne, $v_1 = 0,14$. Un impact équilibré signifie des interactions plutôt faibles, ce qui peut aller dans le sens d'une utilisation efficiente des moyens utilisés.

5 CONCLUSION

Cet article traite de l'agrégation par l'IC dans les SIP et introduit la notion d'impact d'une expression de performance élémentaire retournée par un IP à l'expression globale associée au SIP. Nouvelle information d'aide au pilotage, l'impact établit un lien unique et simple entre expression élémentaire et expression agrégée. Prenant en compte à la fois l'importance de l'expression de performance élémentaire et ses interactions avec les autres expressions élémentaires, l'impact encapsule la complexité du modèle d'agrégation de manière à en faciliter l'exploitation. De par sa vocation, fournir une synthèse unique d'un phénomène, l'agrégation ne traite qu'indirectement des mécanismes d'influence entre les informations à agréger.

Plusieurs perspectives s'ouvrent à cette étude. Revenant à notre préoccupation initiale d'intégration de nouveaux critères comme l'Innovation ou l'Economie de déchets, la première perspective vise à définir et calculer l'expression de la performance élémentaire associée à ce type de critère, préalable à l'agrégation et donc au calcul d'impact avant de traiter un cas industriel.

La deuxième perspective vise à opérationnaliser cette information dans la cadre de l'Industrie 4.0 et en particulier de l'intégrer dans le *Manufacturing Execution System* et sa fonctionnalité d'évaluation de la performance. La recherche s'appliquera d'une part, à définir le format d'affichage propre à développer le management visuel, et d'autre part, à préparer l'aide au pilotage en intégrant outils de simulation et d'optimisation de cet impact.

Enfin, la dernière perspective envisage de revisiter les méthodes multicritères pour la collecte d'expertise. Actuellement, les paramètres de l'opérateur d'agrégation sont identifiés par une expertise sur des situations « fictives »

mal connues du pilotage. L'idée serait d'utiliser l'expertise du pilotage, à notre avis plus accessible, sur l'impact des différentes expressions de performance élémentaires, pour en déduire les indices de Shapley et les coefficients d'interaction.

REFERENCES

Arnold, D.K., Voigt, K.I., 2016. How Industry 4.0 Changes Business Models in Different Manufacturing Industries. In *Proceedings of the XXVII ISPIM Innovation Conference, Blending Tomorrow's Innovation Vintage*. Porto, Portugal. p. 1-20

Atik, H., Ünlü, F., 2019. The Measurement of Industry 4.0 Performance through Industry 4.0 Index: An Empirical Investigation for Turkey and European Countries. Procedia Computer Science. 3rd World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship Industry 4.0 Focused Innovation, Technology, Entrepreneurship and Manufacture. Vol. 158, p. 852-860.

Bana e Costa, C., De Corte, J.M., Vansnick, J.C., 2012. MACBETH. International Journal of Information Technology & Decision Making. Vol. 11(02), p. 359-87.

Bana e Costa, C., Vansnick, J.C,. 1997. Applications of the MACBETH Approach in the Framework of an Additive Aggregation Model. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. Vol. 6(2), p. 107-14.

Berrah L., Montmain J., Mauris G., Clivillé V., 2011, Optimising industrial performance improvement within a quantitative multi-criteria aggregation framework, Int. J. of Data Analysis Techniques and Strategies, Vol. 3 (1), p.42-65,

Berrah, L., Clivillé, V., Montmain, J., Mauris, G., 2019. The Contribution Concept for the Control of a Manufacturing Multi-Criteria Performance Improvement. Journal of Intelligent Manufacturing. Vol. 30(1), p. 47-58.

Berrah, L., Clivillé, V., Foulloy. L., 2018. Objectifs et performances industriels: Concepts et traitement flou. ISTE Group.

Bititci, U. S., Suwignjo, P., Carrie, A.S., 2001. Strategy Management through Quantitative Modelling of Performance Measurement Systems. International Journal of Production Economics, Productivity, Performance and Valuation. Vol. 69 (1), p. 15-22.

Bitteau, R., Bitteau, S., 1998. Maîtriser Les Flux Industriels. Editions d'organisation.

Büchi, G., Cugno., Castagnoli. R., 2020. Smart Factory Performance and Industry 4.0. Technological Forecasting and Social Change. Vol. 150 (January).

Clivillé, V., Berrah, L., Mauris, G., 2007. Quantitative Expression and Aggregation of Performance Measurements Based on the MACBETH Multi-Criteria Method. International Journal of Production Economics. Vol. 105(1), p. 171-89.

Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F, Frank, A.G., 2018. The Expected Contribution of Industry 4.0 Technologies for Industrial Performance. International Journal of Production Economics. Vol. 204, p. 383-394.

Ducq, Y., Vallespir, B., Doumeingts, G., 2001. Coherence Analysis Methods for Production Systems by Performance Aggregation. International Journal of Production Economics, Productivity, Performance and Valuation. Vol.69(1), p. 23-37.

Fishburn P., 2001Measurement Theory: Conjoint, in International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences,

Frank, A.G., Mendes, G.H.s., Ayala, N.F., Ghezzi, A., 2019. Servitization and Industry 4.0 Convergence in the Digital Transformation of Product Firms: A Business Model Innovation Perspective. *Technological Forecasting and Social Change.* Vol. 141, p. 341-51.

Globerson, S,. 1985. Issues in Developing a Performance Criteria System for an Organization. *International Journal of Production Research.* Vol. 23 (4), p. 639-646.

Grabisch, M., 1996. The Application of Fuzzy Integrals in Multicriteria Decision Making. *European Journal of Operational Research.* Vol. 89(3), p. 445-56.

Grabisch, M., Marichal, J.L., Mesiar, R., Pap, E., 2011. Aggregation Functions: Means. *Information Sciences.* Vol. 181 (1), p. 1-22.

Johnson, H.T., 1975. Management Accounting in an Early Integrated Industrial: E. I. DuPont de Nemours Powder Company, 1903-1912. *Business History Review.* Vol. 49 (2), p. 184-204.

Kaplan, R.S., Norton, D.P., 2001. Comment Utiliser Le Tableau de Bord Prospectif. *Editions d'Organosation*. p. 440.

Krantz, D.H., Luce, R.D., Suppes, P., versky, T., 1971. Foundations of Measurement. *Additive and polynomial representations, Academic press*. Vol. 1.

Kueng, P., 2000. Process Performance Measurement System: A Tool to Support Process-Based Organizations. *Total Quality Management*. Vol. 11 (1), p. 67-85.

Labreuche, C., Grabisch, M.,. 2003. The Choquet Integral for the Aggregation of Interval Scales in Multicriteria Decision Making. *Fuzzy Sets and Systems, Preference Modelling and Applications.* Vol. 137 (1), p. 11-26.

Lauras, M., Marques, M., Gourc, D., 2010. Towards a Multi-Dimensional Project Performance Measurement System. *Decision Support Systems.* Vol. 48(2), p. 342-53.

Marichal, J.L., 2004. Tolerant or Intolerant Character of Interacting Criteria in Aggregation by the Choquet Integral. *European Journal of Operational Research, Traffic and Transportation Systems Analysis.* Vol. 155(3), p. 771-91.

Mayag, B., Grabisch, M., Labreuche, C., 2011. A Characterization of the 2-Additive Choquet Integral through Cardinal Information. *Fuzzy Sets and Systems, Preference Modelling and Decision Analysis.* Vol. 184(1), p. 84-105.

Müller, J.M., Buliga, O., Voigt, K.I., 2018. Fortune Favors the Prepared: How SMEs Approach Business Model Innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change.* Vol.132, p. 2-17.

Neely, A., 2005. The evolution of performance measurement research: Developments in the last decade and a research agenda for the next. International *Journal of Operations & Production Management.* Vol. 25(12), p. 1264-1277.

Nudurupati, S. S., Bititci, U. S., Kumar, V., Chan, F. T. S., 2011. State of the Art Literature Review on Performance Measurement. *Computers & Industrial Engineering.* Vol. 60(2), p. 279-290.

Reischauer, G., 2018. Industry 4.0 as Policy-Driven Discourse to Institutionalize Innovation Systems in Manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change.* Vol.132, p. 26–33.

Rosa P., Sassanelli C., Terzi S., 2019. Towards Circular Business Models: A systematic literature review on classification frameworks and archetypes, *Journal of Cleaner Production.* Vol. 236, 17 pages.

Roy, B., 1993. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. *Economica*. p. 423.

Saaty, T.L., 1977. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*. Vol. 15(3), p. 234-81.

Shah, L. A., Etienne, A., Siadat, A., Vernadat, F., 2016. Decision-Making in the Manufacturing Environment Using a Value-Risk Graph. *Journal of Intelligent Manufacturing.* Vol. 27(3), p. 617-630.

Sikdar, S.K., 2003. Sustainable Development and Sustainability Metrics. *AIChE Journal.* Vol. 49(8), p. 1928-32.

ANALYSE TOPOLOGIQUE DES STRUCTURES DE DONNEES : APPLICATION A LA MIGRATION DES SYSTEMES D'INFORMATION D'ENTREPRISE

François Loison[1], Piers Barrios[1,2]

francois.loison@gfi.fr, piers.barrios@utc.fr
[1]Gfi Informatique, France
[2]Université de technologie de Compiègne, France

Christophe Danjou[3], Benoit Eynard[2]

christophe.danjou@polymtl.ca, benoit.eynard@utc.fr
[3]Polytechnique Montréal, Canada

RESUME : *La migration des données de gestion de cycle de vie des produits demande de maîtriser les projets de transformation de données impliquant d'importants volumes de données complexes. Généralement, la complexité est liée à la topologie du graphe de relation entre les objets et les liens.*
Lors du cadrage d'un tel projet, il faut être capable de mesurer sa complexité en un temps très court afin d'estimer la charge nécessaire de manière fiable. D'autre part, certains projets de transformation de données présentent un haut degré de complexité. Leur analyse demande une approche holistique et une remise en cause des lotissements de données ou de l'organisation des acteurs du projet.
Ces besoins ont engendré l'initiative Data Systemizer qui a élaboré une méthode outillée dédiée aux projets de transformation de données permettant de faire émerger le meilleur lotissement de données et de le représenter graphiquement dans un formalisme naturel aux décideurs et de fournir des livrables clefs permettant de maîtriser l'exécution du projet. Le « graphe de données inextricable » doit ainsi devenir un ensemble clair et synthétique de lots liés entre eux, celui-ci étant optimisé mathématiquement pour minimiser les dépendances entre lots.

MOTS-CLES : *Gestion du cycle de vie du produit, Gestion des connaissances, Industrie 4.0, Systèmes cyber-physiques / IoT (Internet of Things), Système d'information d'entreprise, Modèle de données*

1 INTRODUCTION

Un système d'information PLM (SI PLM) est un système d'information dédié à la gestion du cycle de vie produit. Selon (Abramovici et Schulte, 2007), "PLM is an integrated approach including a consistent set of models, methods and IT tools for managing product data, engineering processes, and tools throughout the product lifecycle."

Les processus métier de gestion des données produit, qu'ils soient normatifs ou spécifiques à une entreprise évoluent constamment. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sur lesquelles repose le SI PLM évoluent elles-aussi. Un SI PLM est donc soumis à une double pression métier et technique qui rend nécessaire une migration du système tôt ou tard.

Le cas de la migration est généralement compliqué. Le système source et le système cible ne sont pas forcément bâtis sur la même solution produit ce qui induit un redéveloppement complet du système. Certaines migrations fusionnent plusieurs systèmes source et un système cible, ce qui engendre une complexité accrue. La mécompréhension ou la sous-estimation de la complexité engendre des erreurs d'estimation de la charge du projet et par la suite des délais et surcoûts lors de l'exécution du projet (Friedman, 2019).

Comparée à d'autres systèmes d'information d'entreprise tels que les logiciels de pilotage de la production (MES) ou les progiciels de gestion intégré (PGI – ERP), la migration des données PLM est fondamentale dans le sens où la donnée PLM est ontologiquement constitutive des structures de données techniques (Bricogne *et al.*, 2014) (Eynard *et al.*, 2004).
Les systèmes PLM et se distinguent du cas général par la complexité de leurs liens (par exemple des liens sur entre un objet et un lien) et le nombre de liens qui augmente la complétude des graphes de données.

La mise en œuvre de la migration de données PLM est difficile parce que :

- La stratégie de migration de données est dimensionnante mais est généralement élaborée à partir d'une réalité théorique produites par des sachants qui peut être très éloignée de la réalité des données.
- Un outillage permettant de migrer effectivement les données est nécessaire (Friedman, 2019), l'expérience de nombreux projets de migration de données montre qu'il est en général spécifique.
- Les méthodes projets (En V, Agile ou Scrum) préconisent des approches itératives mais n'expliquent pas comment définir les itérations dans le cas de la migration de données.

Un élément clef de la stratégie de migration est la définition du phasage de la migration en procédant par des lots

séparés (Friedman, 2019). L'identification de ces lots est analogue à une opération de lotissement des données (clustering), tout en minimisant les dépendances entre les lots. L'article définira un critère de mesure de la qualité du lotissement afin qu'il puisse engendrer une migration de données efficace. Ce critère permet de comparer des stratégies de migration de données.
Pour répondre à ces difficultés, notre article s'intéressera à une méthode outillée permettant de définir, simuler et comparer plusieurs stratégies de migration de données tout en fournissant des livrables clefs permettant de maîtriser l'exécution du projet. Il sera structuré de la manière suivante : nous nous focaliserons sur l'état de l'art de l'interopérabilité et la migration des données PLM. La proposition de méthode outillée soulignera les difficultés rencontrées et les choix faits pour atteindre une solution utilisable. Cette proposition sera illustrée par des cas d'étude industriel. Pour finir, une discussion, une conclusion et une vue d'ensemble des travaux futurs complètera cet article.

2 DE L'INTEROPERABILITE A LA MIGRATION DES DONNEES

2.1 Interopérabilité

Le cadre européen d'interopérabilité (EIF, 2017) définit quatre dimensions : légale, technique, sémantique et organisationnelle. L'interopérabilité sémantique est la clef ; « Semantic interoperability is the key one here; it is the ability to automatically interpret the information exchanged meaningfully and accurately in order to produce useful results as defined by the end users of the systems under consideration » (Vernadat, 2010).
(ISO 14258, 1998) explique que l'interopérabilité sémantique peut être atteinte de trois manières :

- Intégrée : « Avec les modèles intégrés, il existe une forme de modèle standard » La principale limite est ici la standardisation des modèles.
- Unifiée : un méta-modèle existe et représente l'ensemble des modèles existants. Par conséquent, il est possible d'établir une correspondance entre les divers modèles.
- Fédérée : les modèles sont hétérogènes et reposent sur l'établissement de correspondances dynamiques.

Pour approfondir sur le sujet de l'échange de données et de l'interopérabilité, le lecteur peut consulter les articles suivants pour un état de l'art plus détaillé : (Rachuri *et al.*, 2008), (Fortineau *et al.*, 2013), (Sriti *et al.*, 2015), (Leal *et al.*, 2019) et (Danjou et al, 2017).

Enfin, l'intégration est la façon la plus sollicitée d'aboutir à l'interopérabilité au sein du PLM dans l'industrie, or pour qu'une intégration se réalise, il faut nécessairement passer par une migration des données.

Concernant les normes existantes qui pourraient être considérées sont principalement l'ISO 10303 et notamment le protocole d'application AP239 aussi connu sous le nom de PLCS et la dernière version de l'AP242 visant l'interfaçage des solutions PLM et CFAO. D'autres travaux intéressants sont ceux relatifs à la norme ISO 13584 aussi appelée PLib mais qui malheureusement datent désormais un peu et n'ont pas connu une exploitation effective.

2.2 Migration des données PLM

Les recherches au travers de Scopus, Web of Science et de Google Scholar ont mis en exergue les éléments suivants.

Il existe des documents relatifs à la migration de données dans le domaine général (non spécifique PLM).
Les travaux retenus sont :

- (Friedman, 2019) propose des éléments méthodologiques pour réussir une migration de données. L'article propose une approche minimaliste limitant le nombre de sources de données et de données à migrer, insiste sur l'évaluation d'un phasage de migration et l'utilisation d'outils efficaces. Il est recommandé de se focaliser le plus tôt possible sur la qualité des données.
- (Wu *et al.*, 1997) propose différentes méthodes intéressantes de migration de données permettant de structurer un projet de migration de données. La méthode *Butterfly* propose de migrer graduellement les données, ce qui correspond à une approche itérative, mais n'explique pas comment déterminer des lots de données applicables.
- (Kuncheria, 2007) met en évidence les points clefs d'une migration de données sans toutefois les aborder dans ces termes : « Migration of data from legacy enterprise data-systems is one of the important and challenging tasks for most PLM implementations. […] Moreover, the dependency of production activities on data, that is complete and accurate, stresses the importance for error free data migration. Translating data stored in formats as required or limited by legacy systems to conform to the PLM system specifications only adds to the complexity. » Cependant, au travers de l'article, le processus de migration de données réel n'est ni explicité, ni détaillé.

Aucun de ces travaux ne nous permet concrètement d'élaborer et de vérifier une stratégie de migration de données, si possible reposant sur une approche itérative et en procédant par phases, par lots de données séparés (Friedman, 2019).

3 DATA SYSTEMIZER : UNE METHODOLOGIE DE MIGRATION DES DONNEES

La problématique consiste à produire plusieurs stratégies de lotissement de données (clustering) simulées à partir des données sources et de les comparer afin de produire

des éléments décisifs permettant de choisir la meilleure stratégie de migration de données.

Pour répondre à cette problématique, nous proposons une méthode outillée standard et réutilisable concrétisée par un atelier de génie logiciel nommé Data Systemizer qui repose sur deux principes fondateurs :

- Découper un problème complexe en plusieurs problèmes plus simples tout en optimisant le découplage des sous-systèmes. En appliquant ce principe à la problématique étudiée, il s'agit de découper les données en lots de données les plus indépendants possibles.
- Simuler la stratégie et le processus de migration de données à l'aide d'un outil disposant d'un méta-modèle unifié mis en correspondance avec les modèles de données source (multiples ou pas) et cible.

Le Data Systemizer nécessite un modèle de données spécifiquement conçu pour s'adapter rapidement aux multiples grammaires et modèles de données source existant et être concis pour faciliter le paramétrage des analyses et être performant. Nous présenterons un premier modèle permettant d'effectuer une seule passe de lotissement (regroupement) produisant des lots d'objets et de liens ainsi que des dépendances de lots. Nous verrons par la suite comment généraliser ce modèle pour que le même modèle puisse supporter N passes de lotissement.
Nous traiterons du modèle de données en premier lieu puis aborderons le lotissement des données.

Note : pour tous les graphes de lotissement présentés, Les rectangles sont des lots de données, leur label contient les nombres d'objets et de liens inclus. Les flèches sont des dépendances de lots, leur label contient le nombre de liens. La couleur des lots ou dépendances de lots est signifiante et est expliquée pour chaque illustration.

3.1 Modèle de données concis et généralisé

Les SI PLM ayant tendance à embarquer le plus d'information possible, le nombre d'attributs par entité (objet ou lien) est élevé.
L'utilisation d'un tel modèle aurait l'inconvénient suivant : le nombre de types et d'attributs trop élevé demande une activité de paramétrage du modèle du Data Systemizer trop importante. Les études étant réalisées en 2 à 6 semaines, cette surcharge n'est pas acceptable donc le modèle de données du Data Systemizer doit être simplifié pour ne garder que l'essentiel nécessaire aux analyses, cette approche étant par ailleurs bénéfique à la performance.
Afin de pouvoir réaliser des choix sur la topologie des données, seul un sous-ensemble des entités et de leurs attributs est requis. Le modèle du Data Systemizer ne doit contenir que les entités et les attributs nécessaires au lotissement des données. Le modèle résultat est qualifié de concis.

Les SI PLM ont également tendance à ramifier les arborescences de types. Cette tendance multiplie le nombre de types du système. Pour généraliser le modèle, nous regroupons tous les types enfants en une seule entité parente afin de faciliter la définition des règles d'analyse. Le modèle concis et généralisé respecte l'approche « intégrée » de l'interopérabilité sémantique. En pratique, cette approche a toujours fonctionné, quelle que soit la diversité des modèles de données client ou la diversité des modèles de solution éditeur.

3.2 Modèle logique homogène

Le modèle logique du Data Systemizer permet d'affecter des objets et liens entre objets à des lots. Voici un aperçu d'une première ébauche de modélisation :

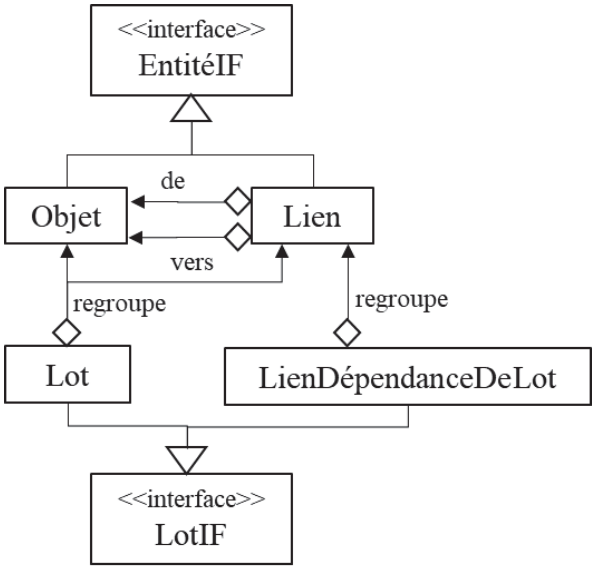


Figure 1 - Ebauche de modélisation

Cette modélisation définit des objets et des liens, qui implémentent l'interface *EntitéIF*. Un lien binaire pointe vers deux objets. Pour produire des lots de données, le Data Systemizer applique des algorithmes de lotissement sur les entités, ils créent des lots et assignent les entités aux lots. Dans le cas de lots interdépendants, les liens entre deux lots sont affectés à un type de lot particulier nommé *LienDépendanceDeLot* qui ne peut contenir que des liens.
Ce modèle ne fonctionne que pour une passe de lotissement car les lots et les dépendances de lots ne sont pas des entités. Nous souhaitons que le modèle puisse effectuer plusieurs passes de lotissement. On constate qu'il existe un isomorphisme: Objet est isomorphe à Lot, Lien est isomorphe à *LienDépendanceDeLot*. Pour généraliser le modèle, on définit la classe d'une entité comme le numéro de la passe du lotissement et on déclare que les lots et les dépendances de lot sont aussi des entités.

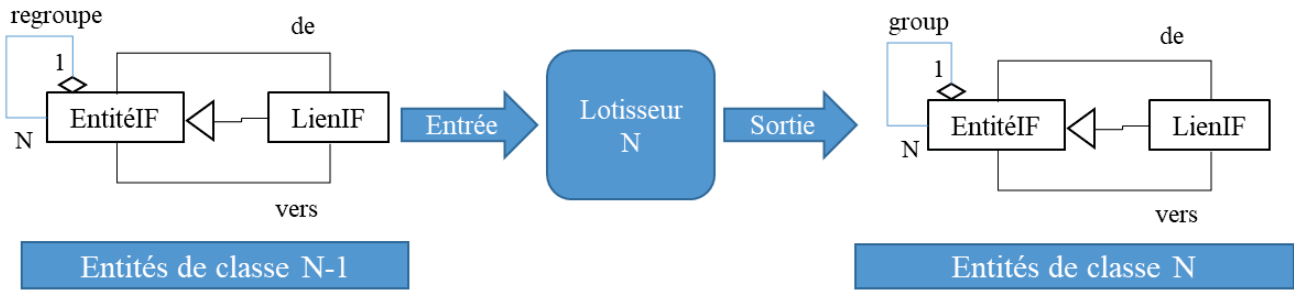


Figure 2 - Modèle homogène

Le modèle dénommé « Entité/Lien » est représenté sur la **Figure 2**.

Le tableau suivant précise les entités et leurs classes correspondantes :

Elément	**Classe d'entité**
Objet ou lien	Entité[0]
Lot ou Dépendance de Lot contenant des Entités[N-1]	Entité[N]

Le modèle Entité/Lien est homogène : il est identique par isomorphisme après une passe de lotissement, ce qui permet d'enchaîner une nouvelle passe de lotissement sans rupture de modèle. Cette caractéristique simplifie fortement la mise en œuvre du moteur de lotissement.

3.3 Lotissement

Lotissement est l'équivalent en sémantique métier PLM de « regroupement » ou « clustering ». L'objectif du lotissement est en premier lieu de répondre aux besoins du client, par exemple de lotir les données par programmes métier (famille de produits) ou par exemple par site physique. Dans un deuxième temps, il faut vérifier que le lotissement est phasable. Par exemple, un lotissement en sites physique avec de nombreuses dépendances bidirectionnelles entre les sites physiques n'est pas phasable, un site physique n'est pas migrable individuellement car les données résultantes ne seront pas complètes puisque les liens vers l'autre site n'auront pu être migrées.
Les critères expliqués ci-après permet de mesurer et comparer l'efficacité de lotissements de données :

- Faible couplage des lots de données pour pouvoir paralléliser le traitement des lots de données.
- Lots de données les plus signifiants fonctionnellement : les données et leurs dépendances doivent contenir un ou plusieurs produits métiers complets pour permettre la validation métier.
- Les lots doivent être décomposés en un arbre de lots faiblement couplés de manière à pouvoir appliquer récursivement ce processus au niveau des sous-lots pour produire efficacement des lots de données de test pour une volumétrie et un taux d'erreurs donnés.

Le Data Systemizer est conçu pour paramétrer rapidement un ou plusieurs lotissements et de mesurer leur efficacité selon les critères expliqués précédemment. Il propose des « lotisseurs » qui sont des algorithmes qui prennent des entités en entrée et produisent des lots et dépendances de lots en sortie. Le lotissement est constitué par l'assemblage d'une séquence de lotisseurs.
Il y a deux catégories de lotisseurs :

- Lotisseur métier : ils utilisent des paramètres métier fournis explicitement par le métier et disponibles dans les données. Par exemple : lotir les données par le nom d'un programme (ensemble de produits métier), lotir les données par site de fabrication, lotir les données par intervalle de date de dernière modification.
- Lotisseur mathématique : il analyse la topologie du graphe et ne requiert pas de paramètre métier. Par exemple : le lotisseur Metis effectue une partition du graphe fourni en sous-graphes tout en réduisant les dépendances des sous-graphes ; le lotisseur Bill Of Material (BOM) groupe les entités jusqu'à ce qu'une entité soit réutilisée.

Metis (Abou-Rjeili et Karypis, 2006) est un outil de partitionnement de graphe prenant en entrée un graphe et le nombre souhaité de partitions N. Il produit N sous-graphes optimisés pour réduire le nombre d'arêtes joignant deux partitions. Metis est utilisé par la stratégie de lotissement « meilleur que Big Bang » ayant pour but de décomposer les données en lots les plus indépendants possible afin de réduire la complexité de la migration.

Les lotisseurs peuvent être assemblés sans contrainte technique, ce qui produit une forte combinatoire de stratégies de lotissement possibles. Il est ainsi possible de produire plusieurs graphes de lotissements afin de choisir celui qui est le plus en adéquation avec les besoins clients et qui est le plus efficace.

3.4 Connexion à l'ETL

Une fois l'analyse du lotissement des données effectuée et validée, il faut migrer effectivement les données vers le système cible en respectant le phasage défini par la stratégie de migration de données.
L'état de l'art actuel consiste à effectuer un traitement par l'ETL de lots de taille importante, par exemple de 1M de données et de liens. Une défaillance sur le traitement une entité va entrainer des défaillances sur les liens dépendants de cette entité. Le phénomène se poursuit produisant des erreurs en cascade ayant des impacts négatifs sur le traitement du lot : il n'est pas testable fonctionnellement et un grand nombre d'erreurs est reporté (600k constaté pour 1M de données en entrées). Il faut

alors identifier les causes racines de erreurs ce qui demande un effort d'analyse important.

Le Data Systemizer dispose d'une interface permettant de piloter l'outil ETL réalisant effectivement la migration de données. Cette interface fournit à l'ETL des fichiers par lots contenant les données avec une grammaire identique à celle des fichiers source. Elle lance une opération ETL sur un lot données et analyse les résultats de l'opération pour décider si les lots suivants doivent être traités ou s'il faut interrompre l'opération, afin d'éviter les erreurs en cascade.

4 APPLICATION

4.1 Simuler la fusion de deux systèmes sources dans un PLM cible

Un client souhaite fusionner des données *as-designed* et *as-built* provenant de deux systèmes distincts dans un PLM cible. Pris séparément, les systèmes existants sont intègres. Comme il n'existe pas de vérification systématique de la cohérence des données *as-designed* et *as-built*, le client suppose qu'il y aura des données irréconciliables ou erronées. Cependant leur volumétrie et leur identification n'est pas qualifiée ce qui empêche de dimensionner les chantiers de nettoyage de données de systèmes source et dans une certaine mesure des activités de migration.
L'état de l'art actuel consiste à démarrer le projet de migration et de mesurer la qualité de réconciliation des données après la fabrication et l'exécution de plusieurs itérations de l'outil ETL cible. Le nettoyage des données démarre tardivement et se retrouve dans le chemin critique du projet de migration.
Le Data Systemizer est utilisé pour simuler la réconciliation des données en phase d'étude de la migration de données. Les résultats permettent de lancer le chantier de nettoyage des données plus tôt.

Après paramétrage des règles de réconciliation, le Data Systemizer simule la réconciliation des données et donne un état complet des erreurs de réconciliation rencontrées.
Le Data Systemizer est paramétré pour réconcilier les données, rechercher les erreurs et regrouper les données par îlots le plus indépendant possibles.
La **Figure 3** montre le graphe du contenu d'un îlot de données indépendant mis en évidence par l'outil.

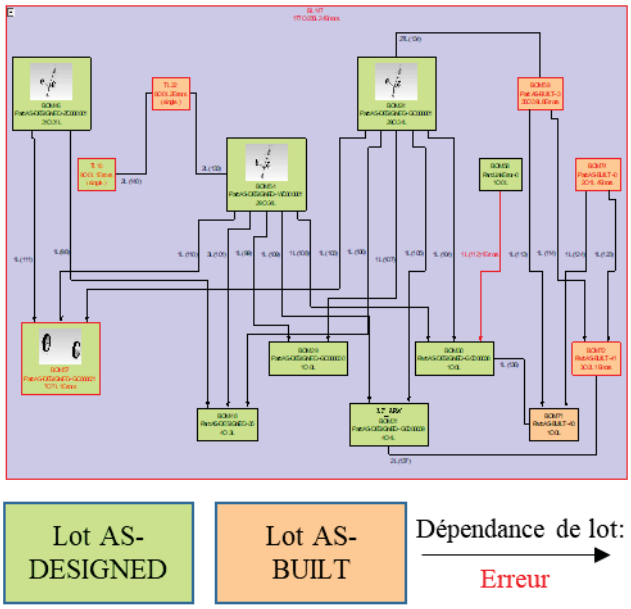


Figure 3 : Contenu d'un îlot de données

Des lots issus de la réconciliation *as-designed / as-built* ont été produit pour le lot métier concerné (lot englobant du graphe). Une dé-décomposition plus fine a été produite. Les 3 lots vert clair avec une image de charriot de golf sont des lots contenant le haut de l'arborescence d'un produit métier. L'un d'entre peut être sélectionné pour exporter un jeu de test fonctionnement significatif, qui permettra d'élaborer et de tester l'ETL avec un temps d'itération court.

En synthèse :

- Le Data Systemizer a simulé la réconciliation et le chargement des données dans le PLM cible. Il a identifié les erreurs de réconciliation et d'intégrité référentielle (liens orphelins) et a permis de dimensionner et alimenter le chantier de nettoyage des données.
- La stratégie de migration des données a été confortée par la mise en évidence d'îlots de données indépendants et extractibles.
- Certains îlots de données sont devenus des jeux de données de test qui ont permis d'initier le développement itératif de la chaîne de production ETL[1].

4.2 Mesurer la qualité topologique d'un déploiement par « Data Packages » séquentiels

Le client souhaite migrer des données d'un système originel de gestion des exigences vers un système PLM. Les données d'une volumétrie de 5M d'entités sont organisées par Data Packages (DP) séquentiels qui sont chargés par ordre chronologique.

En appliquant les pratiques de l'état de l'art actuel, le chargement prend quatre jours sur le système cible, le

[1] Extract/Transform/Load (ETL) : atelier logiciel spécialisé dans l'exécution de migration de données

mode itératif est coûteux. Les erreurs sont très nombreuses et demandent une analyse *ad hoc* jetable pour identifier les causes racines.
Le client souhaite diminuer le coût et le délai d'une itération de chargement, c'est l'objectif se lequel se focalise le Data Systemizer.

Les principales erreurs proviennent d'erreurs de dépendances chronologiques de chargement des data packages illustrées dans la **Figure 4**.

La **Figure 4** indique un cas correct et un cas incorrect de précédence chronologique des Data Packages. Dans le cas correct toutes les dépendances de DPs suivent la chronologie de chargement des DPs. Dans le cas incorrect, le DP1 utilise des données du DP2 (flèche de dépendance rouge). Le DP1 ne peut pas être chargé puisqu'il qu'il nécessite des données du DP2 qui n'est pas encore chargé.

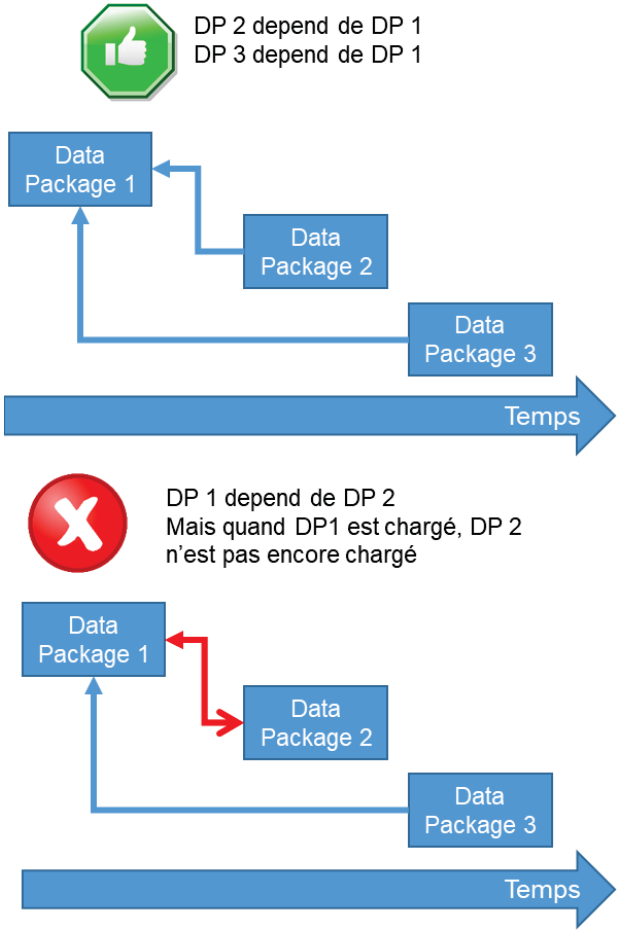


Figure 4 - Illustration des règles de chargement des DP

Le Data Systemizer dispose d'un mode d'analyse chronologique qui est activé. La simulation de la première livraison du client prend vingt minutes et aboutit au graphe suivant :

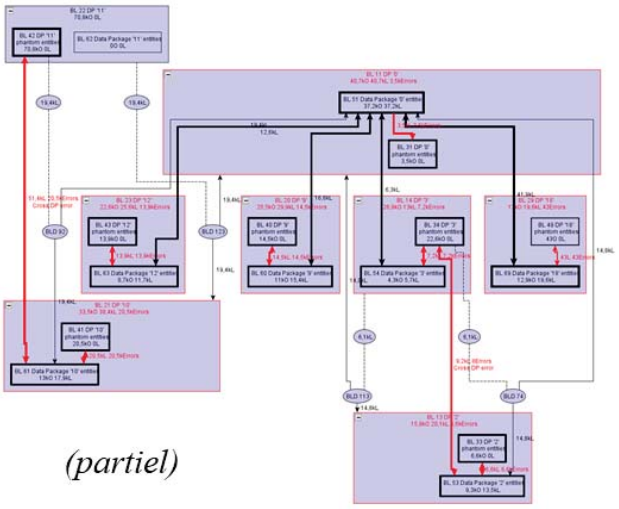


Figure 5 - Première Analyse

La **Figure 5** présente la première analyse effectuée. La couleur rouge indique que des règles de cohérence n'ont pas été respectées. La topologie du graphe de Data Packages est confuse. Le client améliore son processus d'extraction des données à l'aide des rapports fournis par le Data Systemizer.

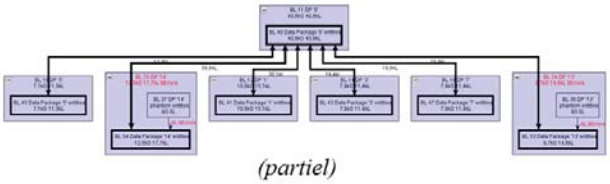


Figure 6 - Quatrième Analyse

La **Figure 6** présente le quatrième essai qui est concluant : La topologie est lisible, les erreurs restantes sont internes aux Data Packages. Un Go pour chargement à blanc est donné, il confirme les résultats de l'analyse.

Ainsi, le Data Systemizer a simulé un chargement par Data Packages chronologique. Le rapport de vélocité est flagrant : 20 minutes contre 4 jours. Les résultats de simulation sont globalement conformes aux tests réels ceci a permis de diminuer la charge des itérations.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article a proposé une méthode outillée permettant par une approche holistique et centrée métier d'analyser et réduire la complexité de la migration de données, tout en fournissant des critères pour mesurer l'efficacité d'une stratégie de migration de données. Cette méthode outillée dispose d'un méta-modèle « unifié, concis, généralisé et homogène » lui permettant de supporter la majorité des modèles PLM client. A l'autre bout de la chaîne, une connexion avec les outils ETL permet de piloter la chaîne ETL en appliquant une stratégie déterminée tout en contrôlant le phénomène d'erreurs en cascade.
Les travaux futurs consisteront à améliorer certains lotisseurs mathématiques (adhérence), à améliorer l'interface

graphique et à mesurer l'efficacité de cette méthode pour faciliter son déploiement. Qui plus est, cette méthode outillée peut s'appliquer à d'autres catégories de systèmes d'information d'entreprise : ERP, MES, SLM[2].

REFERENCES

EIF, 2017 Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions, European Interoperability Framework – Implementation Strategy, COM/2017/0134 final, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2017:134:FIN (accessed 04 June 2019).

Abou-Rjeili, A. and G. Karypis, 2006. Multilevel algorithms for partitioning power-law graphs. In: Proceedings 20th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium. Rhodes Island, Greece, p. 10.

Abramovici, M. (2007) Future trends in product lifecycle management (PLM), Proc. of the 17th CIRP Design Conference, Berlin, Germany, p. 665-674.

Bricogne M., J. Le Duigou, and B. Eynard, 2014. Des SGDT au Product Lifecycle Management, Documentaliste-Sciences de l'Information, 51(1), p. 34-37.

Eynard B., T. Gallet, P. Nowak, and L. Roucoules, 2004. UML based specifications of PDM product structure and workflow, Computers in Industry, 55, p. 301–316.

Danjou, Ch., Le Duigou, J., Eynard, B., 2017, Closed-Loop Manufacturing process based on STEP-NC, International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 11(2), p. 233-245.

Fortineau, V., T. Paviot and S. Lamouri, 2013. Improving the interoperability of industrial information systems with description logic-based models-The state of the art. Computers in Industry. 64, p. 363–375.

Friedman T, 2019. Make Data Migration Boring: 10 Steps to Ensure On-Time, High-Quality Delivery. G00448218.

Leal G., W. Guédria and H. Panetto, 2019. Interoperability assessment: A systematic literature review, Computers in Industry, 106111–132.

Rachuri, S., E. Subrahmanian, A. Bouras, S.J. Fenves, S. Foufou and R.D. Sriram, 2008. Information sharing and exchange in the context of product lifecycle management : Role of standards. Computer-Aided Design. 40, p. 789–800.

Renji Kuncheria, J. 2007. PLM implementation at MAN Diesel A/S: a case study. In: Garetti, M., Terzi, S., Ball, P., Han, S. (eds.) Product Lifecycle Management. Assessing the industrial relevance. pp.199-204 Inderscience, Geneva.

Sriti, M.F., I. Assouroko, G. Ducellier, P. Boutinaud and B. Eynard, 2015. Ontology-based approach for product information exchange. International Journal of Product Lifecycle Management. 8, 1.

Vernadat, F., 2010. Technical, semantic and organizational issues of enterprise interoperability and networking, Annual Reviews in Control, 34, 139–144.

Wu, B., Lawless, D., Bisbal, J., Grimson, J., Wade, V., O'Sullivan, and D., Richardson, 1997. Legacy System Migration: A Legacy Data Migration Engine, Proceedings of the 17th International Database Conference (DATASEM '97), Brno, Czech Republic, October 12, 14, 1997. pp 129-138, Ed. Czechoslovak Computer Experts.

Zhong, H., Yan, G., Lei, Y. 2012. Evolution Supporting Class-Cluster Data Model for PLM. In: Jin, D. and Lin, S. (eds.) Advances in Electronic Commerce, Web Application and Communication. pp. 191–196. Springer, Heidelberg.

[2] Service Lifecycle Management (SLM)

13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation - MOSIM'20 - 12 au 14 novembre 2020
Agadir - Maroc "Nouvelles avancées et défis pour des industries durables et avisées"

JUMEAU NUMÉRIQUE : APPROCHES POUR LE MAINTIEN D'UN INVENTAIRE GÉOLOCALISÉ EN TEMPS RÉEL D'UNE COUR À BOIS

S. NANTEL, J. GAUDREAULT

Consortium de recherche en ingénierie des systèmes industriels 4.0
Université Laval
2325 rue de l'université Québec - Canada
sebastien.nantel.1@ulaval.ca, jonathan.gaudreault@ift.ulaval.ca

F. LÉGER

PMPSolutions
300 rue Dieppe
Québec, Québec - Canada
francois.leger@pmpsolutions.ca

RÉSUMÉ : *Pour l'industrie du sciage, l'automatisation des processus décisionnels passe par le maintien d'un inventaire géolocalisé de la cour à bois. Cela constitue un défi technique considérable, notamment parce qu'il s'agit d'un environnement extérieur hostile à la merci des intempéries et où il n'existe pas d'emplacement prédéfini d'entreposage des produits. Nous avons donc entrepris la création d'un jumeau numérique permettant de maintenir en temps réel l'inventaire géolocalisé (x,y,z) d'une cour à bois, malgré le fait que les signaux émanant du monde réel (ex. : coordonnées GPS de la chargeuse) soient bruités. Nous proposons des algorithmes permettant de maintenir le modèle à jour en temps réel. Des expérimentations sont réalisées à partir de données industrielles afin d'identifier le niveau maximal d'incertitude sur les coordonnées GPS tolérable. Les résultats montrent qu'avec nos algorithmes, il serait possible de maintenir l'inventaire à jour en faisant usage de technologies de localisation existante et en adoptant des pratiques d'affaires légèrement modifiées.*

MOTS-CLÉS : *Jumeaux numériques, Industrie 4.0, Simulation, Industrie du bois, Gestion d'inventaire*

1 INTRODUCTION

La production de bois d'œuvre nord-américaine implique plusieurs processus complexes. Dès leur arrivée en usine, les billots de bois sont sciés en plusieurs pièces de longueur, de largeur et d'épaisseur variées. Elles sont alors triées en fonction de leurs dimensions, de l'essence du bois pour ensuite être assemblées sous forme de paquets prenant la forme d'un prisme rectangulaire comptant quelques centaines de pièces identiques (Figure 1). Ceux-ci sont transportés vers une cour extérieure, *la cour à bois*, afin d'y être entreposés temporairement. Étant donné la taille et le poids des paquets, la manutention de ces derniers nécessite l'utilisation d'équipements de transport spécialisés, telle que des chargeuses frontales (Figure 2). Celles-ci doivent être opérées par du personnel qualifié. Éventuellement, les paquets sont transportés de nouveau vers des séchoirs industriels afin d'y être séchés (les paquets sont assemblés sur un wagon qui est ensuite poussé dans le séchoir). Le séchage peut prendre jusqu'à quelques jours. Une fois ce processus terminé, les paquets sont, une fois de plus, transportés et stockés dans la cour pour finalement être envoyés à l'usine de finition. Durant ce dernier processus, les paquets sont désassemblés, les pièces sont rabotées, éboutées et les pièces obtenues sont triées par longueur et par qualité.



FIGURE 1 – Paquets de bois

Dans une optique de modernisation des processus d'affaires et d'amélioration de la performance, l'industrie tend à automatiser et optimiser ses activités. Au-delà des aspects physiques liés à la transformation de la matière, l'enjeu se situe au niveau de l'optimisation des processus logistiques, le tout dans une perspective Industrie 4.0 (Müller, F., 2019). Ces dernières années ont vu l'adoption d'un nombre crois-



FIGURE 2 – Exemple d'une chargeuse frontale utilisée dans la manutention de paquets de bois

sant de systèmes décisionnels pour la prise de décision concernant la gestion des opérations du sciage (Gaudreault J. et al., 2010) (Zanjani M.K. et al., 2011), du séchage (Gaudreault J. et al., 2011) (Marier P. et al., 2016) (Theresia J. et al., 2019) et du rabotage (Marier P. et al., 2014), en plus bien sûr de la gestion des approvisionnements (Beaudoin D. et al., 2006) (Zanjani M.K. et al., 2016), de la logistique et des ventes (Bajgiran O.S. et al., 2016).

Toutefois, bien que la gestion de la cour à bois soit reconnue comme un élément clé dans le processus de transformation du bois (Dramm JR., 2004), celle-ci n'est pas prise en compte lors des prises de décisions. Dès leur sortie du sciage ou du séchoir, les paquets de bois sont entreposés dans la cour selon un arrangement et une disposition généralement laissés à la discrétion de l'opérateur de la chargeuse. Les décisions quant aux choix des produits qui seront séchés et rabotés sont, quant à elles, prises quelques jours plus tard, souvent à l'aide d'un algorithme d'optimisation sans égard à l'emplacement courant des paquets. Pourtant, il y a un potentiel de gain important en ce qui concerne l'efficience de la cour de prendre ces décisions de manière à optimiser les déplacements de la chargeuse dans la cour (Trzcianowska M. et al. 2019). Cette optimisation/planification des déplacements permettrait également, éventuellement, d'automatiser la gestion des déplacements des paquets dans la cour à bois. De plus, cela permettrait une meilleure optimisation des opérations sous-jacentes, notamment sur le choix des paquets à sécher et raboter plutôt que seulement le produit, et ce, en tenant compte des déplacements induits. À terme, les décisions concernant le sciage, le séchage, la finition et la gestion de la cour seraient prises de manière synchronisée.

Toutefois, cette automatisation et cette optimisation passent, avant tout, par le maintien d'un inventaire géolocalisé de la cour à bois (Dumetz L., 2014). Le maintien de cet inventaire constitue un défi technique considérable, notamment parce qu'une cour à bois n'est pas un entrepôt classique : il s'agit plutôt d'un environnement extérieur hostile à la merci des intempéries et où il n'existe pas d'emplacement prédéfini d'entreposage des produits. Les approches actuelles rendent difficile de s'acquitter de cette tâche. Par ailleurs, des essais antérieurs de suivi à l'aide de puces RFID n'ont pas donné de résultats positifs, notamment par manque de fiabilité lors de la manutention de plusieurs paquets à la fois (Pieskä S. et al., 2009), près de bâtiment et dans un environnement entouré de centaines de paquets. Quant aux codes à barres, des étiquettes sont déjà présentes sur les paquets ; elles sont scannées lors des entrées dans les bâtiments, mais leur lecture automatique par les chargeuses lors de la manutention en présence de boue, de neige et de glace pose problème.

Nous avons donc entrepris la création d'un *jumeau numérique* (Boschert S. et Rosen R., 2016) permettant de maintenir en temps réel l'inventaire géolocalisé d'une cour à bois ainsi que les dispositifs pour le mettre à jour en temps réel, et ce, malgré le fait que les signaux émanant du monde réel (ex. : coordonnées GPS de la chargeuse) soient bruités.

L'architecture de ce jumeau numérique est décrite à la section 2. Ensuite, à la section 3, nous comparons la performance de différents algorithmes destinés à maintenir l'intégrité des données. Cela nous permettra d'identifier le niveau maximal d'incertitude sur les coordonnées GPS tolérable afin de maintenir l'inventaire géolocalisé d'une cour à bois. Les expérimentations sont réalisées à partir de données provenant d'un partenaire industriel. Finalement, la section 4 conclut cet article.

2 JUMEAU NUMÉRIQUE

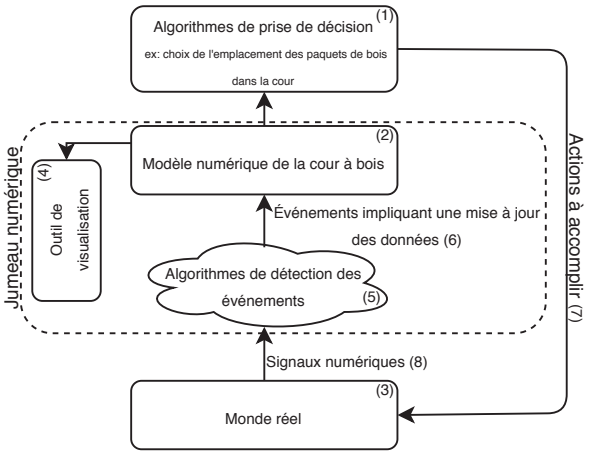


FIGURE 3 – Séquence d'interaction permettant une prise de décision à partir de signaux numériques

La figure 3 synthétise l'architecture proposée. L'élé-

ment central (2) est une base de données contenant pour chaque paquet son emplacement géolocalisé (longitude, latitude), sa hauteur par rapport au sol (les paquets pouvant être superposés) ainsi que son orientation. Les coordonnées de localisation et d'orientation sont également disponibles pour la chargeuse frontale. On y trouve aussi différentes informations de nature statique, telles que la position des infrastructures de la cour (ex. : bâtiments et séchoirs). Le tableau 1 synthétise ces données.

Équipements	Type de données utilisées
Chargeuse	Géolocalisation et orientation
Paquets de bois	Géolocalisation, orientation et élévation
Séchoirs	Géolocalisation
Rails de chargement de séchoirs	Géolocalisation
Sortie du sciage	Géolocalisation
Entrée du rabotage	Géolocalisation
Emplacements de stockage	Géolocalisation

Tableau 1 – Type de données utilisées par le modèle numérique afin de maintenir à jour la représentation de la cour à bois

Ce modèle de données pourra à terme être exploité par différents algorithmes de prise de décisions (1) qui permettront de faire des choix quant aux actions à poser dans le monde réel. Sur la base de ces décisions et d'autres événements survenant en usine, des modifications à l'état physique de la cour surviennent dans le monde réel (3).

Il est nécessaire de détecter ces modifications. Nous pouvons le faire grâce à la captation et l'interprétation de différents signaux numériques (8). Les principaux signaux numériques sont la position GPS de la chargeuse dans la cour (une série de point permettant aussi de déduire l'orientation de la chargeuse). On dispose également du moment de ramassage de paquets (et leur nombre) ainsi que le moment du dépôt de paquets. Cette information peut être déduite des pressions d'huiles dans les bras de la chargeuse.

Il est donc nécessaire, grâce à des algorithmes (5) analysant ces données bruitées d'inférer quels événements (6) ont eu lieu et de mettre à jour la base de données (2).

Un outil de visualisation (4) permet de constater en temps réel l'état de la cour (ou plutôt, de son jumeau numérique) de manière visuelle (Figure 4). Cet outil a joué un rôle primordial lors de la validation du système développé (Section 2.1).

2.1 Validation

Nous avons travaillé avec une scierie qui nous a donné accès à ses installations. Nous avons tout d'abord modélisé la cour (emplacement des bâtiments et infrastructure) à l'aide de données de géolocalisation et de cartes satellites. Par la suite, une caméra vidéo a été installée à bord d'une chargeuse frontale. Celle-ci

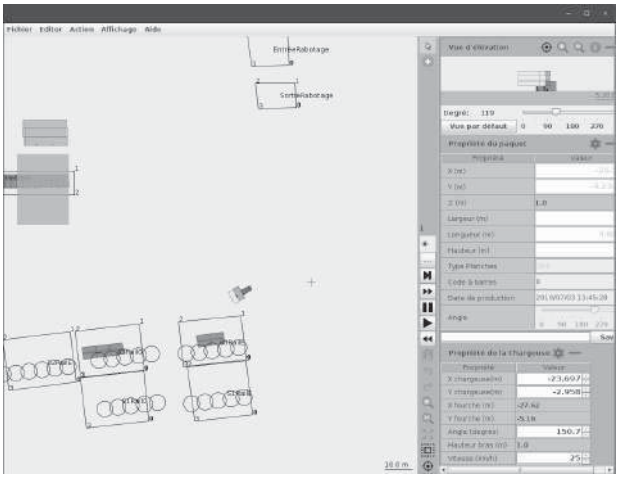


FIGURE 4 – Outil de visualisation du jumeau numérique de la cour à bois

était également équipée d'une balise GPS et de capteurs de pression permettant d'obtenir des signaux de pression d'huile associée au ramassage et au dépôt de paquets. Cela nous a permis de définir un scénario (une liste d'événements) décrivant fidèlement ce qui s'était passé cette journée-là.

L'identification d'une liste des événements de ramassage et de dépôt de paquets ainsi que l'identification des paquets ramassés ont été faites manuellement à l'aide de la vidéo, des pressions d'huile à l'intérieur du cylindre hydraulique du mât de la chargeuse ainsi que de l'horodatage des signaux. Lors du visionnement de la vidéo, l'horodatage des moments de ramassage et de dépôt de paquets a été identifié dans cette dernière. Cet horodatage a permis, par la suite, de retrouver les signaux transmis par la chargeuse à ce moment (position GPS et pression d'huile). À l'aide des données de pression d'huile et de la vidéo, les moments de ramassage et de dépôt ont été identifiés avec précision. Pour chaque moment de ramassage/dépôt identifié dans la vidéo représentant le cas de tests, il a également fallu identifier combien et quels paquets étaient ramassés.

Étant donné que les coordonnées GPS de la chargeuse étaient bruitées, nous avons pu corriger celles-ci puisque nous connaissions le positionnement exact des paquets. En effet, en assignant la coordonnée du paquet nous avons corrigé manuellement, à l'aide de l'outil de visualisation, la coordonnée de la chargeuse, et ce, pour le moment exact de ramassage ou de dépôt du paquet. De ce fait, la correction effectuée sur les données de géolocalisation de la chargeuse a permis de compenser l'incertitude sur les signaux initiaux de positionnement de la balise GPS fournissant ainsi un modèle de référence pour nos expérimentations à venir.

La validation du scénario de référence (liste des événements précédemment identifiés) s'est faite à l'aide de l'outil de visualisation. En effet, en alimentant l'outil

de visualisation avec cette série d'événements, il est alors possible de rejouer le film de la journée de manière virtuelle. En comparant ce dernier avec la vidéo, nous avons alors pu vérifier l'exactitude de notre liste d'événements. Cela montre bien que si la perception des données de géolocalisation et des événements est exacte, il est possible de maintenir le modèle numérique de la cour à bois à jour.

2.2 Incertitude des coordonnées géographiques

Il existe plusieurs niveaux d'incertitudes différents quant à la géolocalisation de la chargeuse. Cette incertitude dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de balise utilisé (Wing M.G., et al., 2005), la présence de bâtiments à proximité (Williams, M. et Morgan, S., 2009), etc. De plus, d'après une étude de la Federal aviation administration (FAA), l'incertitude associée à la composante horizontale est de 1,891 mètre 95% du temps alors que pour la composante verticale, l'incertitude est de 3,872 mètres 95% du temps (Team G.P., 2017).

Il est généralement reconnu que pour une balise GPS standard l'incertitude moyenne est de plus ou moins trois mètres (US DoD, 2020), mais elle peut parfois être d'aussi peu qu'un mètre (Wing M. et al., 2005). Toutefois, pour un véhicule en mouvement, cette incertitude varie davantage. En effet, l'incertitude associée à une balise de type commerciale est d'environ 15 mètres alors que pour une balise professionnelle, l'incertitude est plutôt de l'ordre du mètre (Sun Q., et al., 2017).

L'incertitude associée peut être réduite en faisant usage d'une technique avancée de positionnement, telle que le Differential GPS (DGPS)(Zogg J.M., 2009). Le DGPS fait appel à du matériel supplémentaire pour capter des signaux provenant de stations terrestres fixes. L'incertitude peut être ramenée à l'ordre du mètre, ou même du centimètre selon le type de balise utilisé, la technique de correction du signal de positionnement utilisée et l'utilisation de techniques de post-traitement des données (Skoglund M. et al., 2016)(Ogaja C., 2016). Avec un DGPS, le même niveau d'incertitude est rapporté pour les véhicules en mouvement (Sun QC. Et al., 2017). Il faut cependant noter que les études se contredisent quant à la précision de ces approches.

2.3 Algorithmes de détection des événements

Cette section présente des algorithmes pour réaliser la détection des événements associés aux déplacements de paquets dans la cour à bois. Ceux-ci permettent de compenser (jusqu'à une certaine limite) l'incertitude sur les signaux de géolocalisation de la chargeuse dans la cour à bois.

Nous proposons deux alternatives distinctes. Un premier algorithme exploite les données GPS, les signaux de ramassage et de dépôt obtenus de la chargeuse ainsi que la connaissance de certaines règles d'affaires concernant la manière dont les paquets doivent être ramassés. Le second algorithme est en mesure d'utiliser uniquement les données GPS, mais suppose une meilleure connaissance a priori de certaines règles d'affaires.

2.3.1 Algorithme #1 : Détection des événements en fonction de la position de la chargeuse et des signaux de ramassage et de dépôt obtenus des bras de la chargeuse

Cet algorithme se base sur deux groupes de signaux numériques distincts, soit des signaux de positionnement de la chargeuse dans la cour transmis à l'aide d'une balise GPS installée sur la chargeuse ainsi que des signaux numériques indiquant les moments de ramassage, le nombre de paquets ramassés et les moments de dépôt de paquets. La figure 5 présente la séquence d'interaction de cet algorithme.

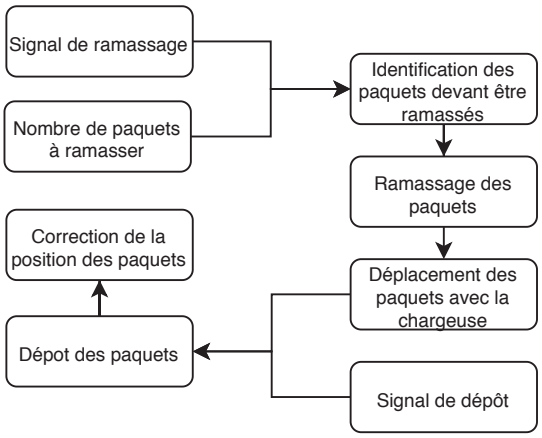


Figure 5 – Séquence d'interaction de l'algorithme #1

Lorsqu'un signal de ramassage est détecté (par exemple, les pressions d'huile des bras nous indiquent que 4 paquets ont été ramassés), l'algorithme identifie alors les paquets qui se trouvent au-dessus des bras de la chargeuse et suppose que les 4 paquets les plus hauts (ex. : 2 paquets de hauts par 2 paquets de profonds) ont été ramassés.

On suppose que les paquets identifiés se déplacent ensuite avec la chargeuse. Lors de la détection ultérieure d'un signal de dépôt, on suppose que les paquets sont déposés à l'emplacement actuel de la chargeuse (ou plutôt, des bras de la chargeuse). Leur position est alors corrigée en fonction de l'emplacement où ils se trouvent. Par exemple, les paquets déposés sur un rail de séchoir sont alignés avec ce dernier (pour cor-

riger l'imprécision du signal GPS). La coordonnée z (élévation) est corrigée en fonction de la hauteur des paquets déjà présents.

Cet algorithme repose sur la prémisse qu'il est possible en tout temps de connaître la masse portée par la chargeuse (nombre de paquets). Or, cela nécessite un équipement coûteux et pas nécessairement fiable. Pour cette raison, nous avons également imaginé un algorithme travaillant uniquement avec le signal GPS. Celui-ci est présenté à la section suivante.

2.3.2 Algorithme #2 : Détection des événements en fonction des entrées/sorties de zones

On suppose tout d'abord que la cour est séparée en différentes zones. Une zone est un espace logique, non physiquement délimité, de la cour où pourraient se trouver plusieurs paquets apparentés. Notamment, les emplacements possibles d'entreposage de paquets, les rails de séchoir, la sortie du sciage et l'entrée du rabotage sont tous considérés comme des zones distinctes.

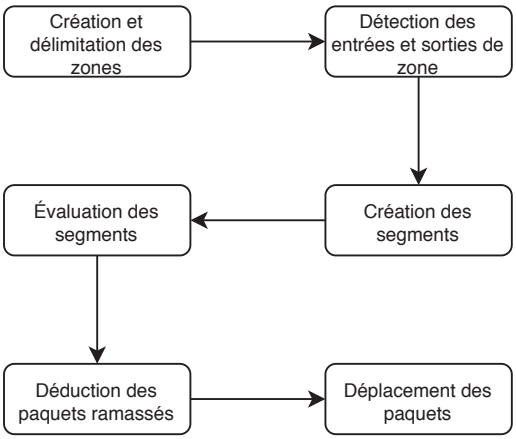


FIGURE 6 – Séquence d'interaction de l'algorithme #2

Le signal GPS est utilisé pour détecter les entrées/sorties de chaque zone. Chaque paire « sortie d'une zone X / entrée dans une zone Y » est identifiée comme étant un segment. Pour chaque type de segment possible, nous avons établi au préalable des règles d'affaires qui nous permettent d'induire si ce déplacement est réputé se faire à vide, avec 1, 2 ou 4 paquets. Par exemple, dans le cas où un segment aurait pour zone de départ un emplacement de stockage de bois non séché et pour zone d'arrivée un rail de séchoir, l'algorithme présumera qu'un déplacement sur ce segment correspond à un déplacement de paquets. Toutefois, l'inverse ne serait pas considéré comme un déplacement de paquets valide. Des règles d'affaires supplémentaires ainsi que la position d'entrée de la chargeuse dans la zone permettent également de déduire quels paquets ont été ramassés. Par exemple, supposons une entrée à une extrémité d'une zone représentant un rail de séchoir. Cette position d'entrée permettra de conclure que ce sont les paquets les plus près de cette extrémité qui seront ramassés.

La figure 6 présente la séquence d'interaction de l'algorithme #2 pour une segment réputé se faire avec des paquets de bois. De plus, la figure 7 présente un exemple simplifié d'analyse des segments impliqués dans le processus de chargement du rail de chargement A et du processus de déchargement du rail de chargement B.

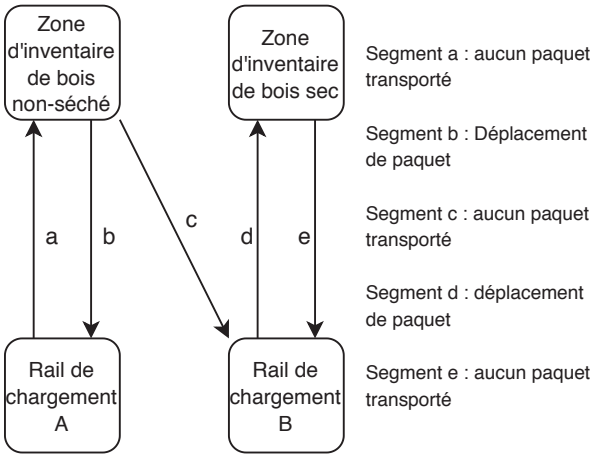


FIGURE 7 – Exemple d'analyse de segments impliqués dans le processus de chargement du rail A et du processus de déchargement du rail B

3 EXPÉRIMENTATION : IMPACT DE L'INCERTITUDE DES DONNÉES GPS

Nous évaluerons à quel point l'incertitude sur la position GPS de la chargeuse a un impact sur la performance des algorithmes précédents (et donc sur la capacité à maintenir notre inventaire géolocalisé). Nous utiliserons comme scénario de référence celui décrit à la section 2.1. Celui-ci permet de reproduire dans le jumeau numérique de manière exacte tous les déplacements de paquets qui se sont produits à l'usine lors de notre période de référence. Nous comparerons ensuite les résultats du scénario de référence avec les résultats que nous aurons obtenus pour différents niveaux de précision GPS.

L'algorithme #1 (détection des événements sur la base de la position de la chargeuse et des moments de ramassage et de dépôt) permet de reproduire intégralement le scénario de référence si les coordonnées précises (non bruitées) lui sont indiquées. Par la suite, nous rejouons le scénario, mais une erreur est ajoutée sur chaque signal de position de la chargeuse permettant ainsi de simuler l'incertitude d'une balise GPS. Nous avons simulé six niveaux d'incertitudes distincts, soit une incertitude de plus ou moins trois mètres (incertitude moyenne pour une balise GPS

commerciale (US DoD, 2020)), deux mètres (niveau de précision le plus probable d'après les données de la FAA (Team G.P, 2017)), un mètre (incertitude atteignable pour des balises commerciales (Wing M. et al., 2005)), trente centimètres (incertitude moyenne d'un DGPS (Sun Q. et al., 2017), dix centimètres (incertitude moyenne pour un véhicule en mouvement avec la technique de position RTK (Sun Q. et al., 2017)) et deux centimètres (niveau de précision maximale atteignable d'après certaines études (Dong Y. et al., 2020)). L'incertitude ajoutée au signal de géolocalisation est générée aléatoirement, mais de manière séparée pour la composante horizontale et verticale en fonction d'une loi normale de moyenne 0 et de variance égal à l'incertitude maximale (Tiberius CCJM. et Borre K, 2000) (Zandbergen PA., 2008).

Lors de la simulation, les paquets de bois sont ramassés d'après les conclusions de l'algorithme de détection des événements, puis on compare les paquets ramassés dans le jumeau numérique avec ceux du scénario de référence. En cas de contradiction entre le scénario de référence et les choix faits par l'algorithme, il y aura une désynchronisation dont nous prendrons note.

Par exemple, supposons que lors d'un événement de ramassage, l'algorithme de construction de segments choisit de ramasser les paquets 1 et 2 alors que, selon le scénario de référence, ce sont les paquets 2 et 3 qui sont ramassés. Dans ce cas, le paquet 1 est considéré comme perdu. Le paquet 3 est également considéré comme perdu puisque le modèle numérique de la cour a perdu la trace de ce paquet. Notons, par ailleurs, que chaque paquet ne peut pas être considéré perdu plus d'une fois.

Il peut arriver qu'un paquet ne soit pas ramassé, mais qu'un autre paquet du même type (même produit, mais pas le même paquet) soit ramassé. C'est alors une faute moindre. Pour cette raison, nous analyserons les résultats à l'égard de deux mesures de performance distinctes : (1) le nombre de paquets perdus en supposant que l'entreprise désire assurer le suivi de chaque paquet individuel d'après son identifiant unique et (2) le nombre de paquets perdus en supposant que l'entreprise désire assurer le suivi par type de produit (on veut savoir qu'il y a un paquet de bois de tel type à cet endroit, mais sans le distinguer d'un autre paquet du même type).

4 RÉSULTATS

Chaque simulation a été répétée 50 fois. Les résultats moyens avec intervalle de confiance (niveau de confiance de 95%) sont ici rapportés.

4.1 Performance pour le suivi des paquets individuels

Les résultats sont rapportés à la figure 8. Avec l'algorithme #1 et l'absence d'erreur GPS, on reproduit sans surprise le scénario de référence de manière intégrale. Pour les deux algorithmes, on observe une augmentation du nombre de paquets perdus à mesure que l'incertitude sur la position de la chargeuse dans la cour augmente. Pour de très petites erreurs GPS (moins de 10 cm) l'algorithme #1 semble préférable. Pour des erreurs supérieures à 10 cm, l'algorithme #2 performe mieux, ce qui est remarquable étant donné que ce dernier utilise moins de signaux. En moyenne, on observe une perte de 11,75 paquets avec l'algorithme #2 versus 17,34 paquets perdus par l'algorithme #1, soit une différence de 6,73%.

En comparant le «film» de la simulation avec le scénario de référence, on peut comprendre davantage d'où proviennent les erreurs. Avec l'algorithme #1 (détection des événements sur la base de la position de la chargeuse et des moments de ramassage et de dépôt), lorsque la chargeuse est positionnée tout près de plusieurs paquets, l'incertitude sur sa position réelle peut engendrer bon nombre d'erreurs au moment d'identifier les paquets ramassés étant donné que cette identification se fait seulement en fonction de la position de la chargeuse. De plus, étant donné l'incertitude sur la position de la chargeuse au moment de déposer des paquets, il peut survenir qu'un paquet soit déposé sur un autre alors qu'il a en réalité été déposé un peu à côté au sol. Cela fera qu'au moment de ramasser de nouveau ce paquet, le mauvais paquet sera identifié étant donné que l'empilement devant la chargeuse n'est pas le bon. Nous avons remarqué qu'une erreur de 30 centimètres (négligeable dans un plan x,y) est suffisante pour engendrer une grande perturbation selon l'axe des z. Il faut descendre à une précision de 2 cm pour s'affranchir de ce type d'erreurs. Dans le cas contraire, le nombre de paquets perdus est beaucoup trop important pour considérer cette approche comme étant viable.

Pour l'algorithme #2 (détection des événements en fonction des entrées et sorties de zone), une très grande erreur GPS est nécessaire pour rater une entrée/sortie de zone. On note malgré tout une dizaine de paquets (toujours les mêmes) qui sont perdus, même lorsque l'erreur GPS est négligeable. Il s'avère que ce sont des déplacements pour lesquels l'opérateur a dérogé aux pratiques établies. Par exemple, lors d'un ramassage de deux paquets, ce sont normalement les deux paquets situés côte à côte au sommet d'une extrémité de la zone qui sont ramassés ; si l'opérateur déroge à cette règle, on perd alors des paquets. Notons que ces règles d'affaires n'étaient pas des règles officielles ; elles ont été déduites en analysant le comportement de l'opérateur de la chargeuse.

Il serait cependant envisageable de formaliser davantage ces règles d'affaires et ainsi nous n'aurions pas observé de pertes de paquets avec l'algorithme #2 pour une erreur GPS de moins de 30 cm. Au-delà de 30 centimètres, l'incertitude sur la position de la chargeuse au moment de son entrée dans une zone devient trop importante pour identifier correctement tous les paquets ramassés. Des règles d'affaires supplémentaires (ex. : spécifier l'ordre dans lequel les paquets d'un chargement doivent être chargés/déchargés d'un séchoir) permettraient une plus grande tolérance à l'erreur de position GPS.

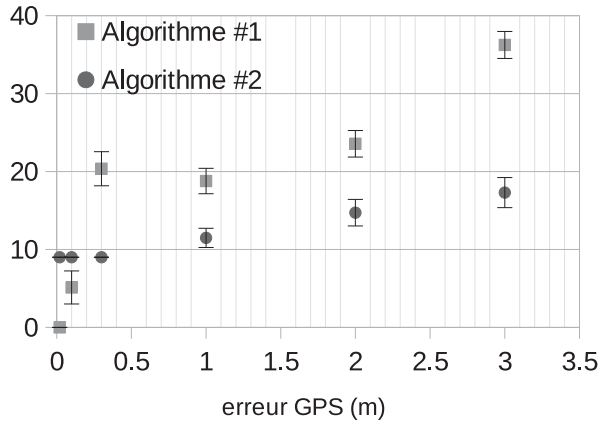


FIGURE 8 – Nombre de paquets perdus par chaque algorithme en fonction de l'erreur GPS (suivis des paquets individuels)

4.2 Suivi par type de produit

On remarque sur la figure 9 que le nombre de paquets perdus est beaucoup moins élevé que pour la figure 8 étant donné que certaines inversions de paquets (qui étaient des erreurs avec la mesure de performance précédente) ne sont plus considérées comme des erreurs.

Pour l'algorithme #1, l'erreur est réduite d'environ 8% en moyenne. Toutefois, le nombre de paquets en erreur augmente rapidement à mesure que l'incertitude augmente également. Pour l'algorithme #2, plus aucun paquet n'est perdu par le modèle lorsque l'erreur sur la position de la chargeuse est de 30 cm ou moins. Pertes qui ont été identifiées avec la mesure de performance basée sur l'identifiant unique des paquets et qui étaient dues au non-respect de certaines règles d'affaires par l'algorithme #2 (voir section précédente). De plus, le nombre de paquets perdus en moyenne pour une incertitude au-delà de 30 cm est de 0,33. Il s'agit d'erreurs reliées à la position GPS qui n'est pas assez précise pour détecter l'emplacement d'entrée de la chargeuse dans une zone. Par exemple, lors du déchargement d'un séchoir, si la chargeuse devait ramasser les quatre derniers paquets d'un empilement, mais qu'étant donné l'incertitude sur sa position d'entrée dans la zone, elle a plutôt ramassé les paquets de l'empilement situé juste à côté où six paquets étaient présents, la chargeuse n'a alors ramassé que deux paquets (d'après les règles d'affaires établies, les empilements de trois paquets de hauts par deux paquets de profonds, se font toujours ramassés suivant la règle 2-4, les deux paquets du dessus suivit des quatre paquets du bas), ce qui cause une perte de deux paquets.

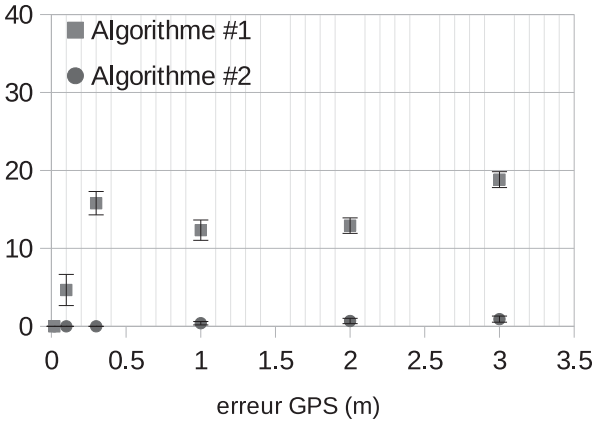


FIGURE 9 – Nombre de paquets perdus par chaque algorithme en fonction de l'erreur GPS (suivis par type de produit)

5 CONCLUSION

Avec la collaboration d'une entreprise du secteur des produits forestiers, nous avons entrepris la mise en place d'un jumeau numérique permettant de maintenir un inventaire géolocalisé d'une cour à bois.

Deux algorithmes de détection des événements permettant ainsi le maintien d'un inventaire géolocalisé ont été proposés et testés. La position de la chargeuse et la connaissance des moments de ramassage et de dépôt des paquets ainsi que le nombre de paquets ramassés ne sont pas suffisants pour compenser l'incertitude sur la position de la chargeuse dans la cour à bois puisque le niveau de précision nécessaire est difficilement atteignable pour une chargeuse en mouvement. En effet, atteindre ce niveau de précision sur la géolocalisation d'un véhicule en mouvement nécessite l'utilisation de techniques et de systèmes complexes qui sont encore à l'étude (Dong, Y. 2020).

Toutefois, cet article démontre également qu'avec l'algorithme de détection des événements en fonction des entrées/sorties de zone, il est possible de maintenir un inventaire géolocalisé dans le cas où aucune distinction n'est faite entre les paquets contenant le même produit. Également, il est possible de maintenir un inventaire géolocalisé à l'aide de l'algorithme de construction de segments à la condition que cer-

taines règles d'affaires soient énoncées a priori et que l'opérateur de la chargeuse respecte celles-ci.

Comme travaux futurs, il serait intéressant de valider une approche hybride afin de compenser les lacunes de chacun des deux algorithmes de détection des événements. De plus, le développement de nouveaux algorithmes permettant de détecter et de corriger certaines situations exceptionnelles, notamment un chargement de séchoir qui ne serait pas au maximum de sa capacité ou qui ne serait pas entièrement vidé, permettrait également d'atténuer le nombre de paquets perdus. Nous croyons également que réorganiser la cour autour de zone mieux délimitée faciliterait le travail de l'algorithme basé sur les segments.

REMERCIEMENTS

Nous tenons, dans un premier temps, à remercier toute l'équipe de PMPSolutions pour leur implication dans le projet. Sans leurs précieux conseils et le partage de leurs connaissances, il aurait été impossible de mener à bien ce projet.

Finalement, nous tenons à remercier Jordan Côté, Dominic Drolet, Pierre-Guillaume Laurin et Elliot Leclerc de nous avoir permis d'utiliser et de modifier l'application qu'ils ont développée dans le cadre du cours GLO-2004.

REFERENCES

Bajgiran, O.S., Zanjani, M.K. et Nourelfath, M., 2016. The value of integrated tactical planning optimization in the lumber supply chain. *International Journal of Production Economics*, 171, p. 22-33.

Beaudoin, D., LeBel, L. and Frayret, J.M., 2006. Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(1), p. 128-140.

Boschert S. et Rosen R., 2016. Digital twin—the simulation aspect. *Mechatronic futures*, springer, p. 59-74.

Dong, Y., Zhang, L., Wang, D., Li, Q., Wu, J. et Wu, M., 2020. Low-latency, high-rate, high-precision relative positioning with moving base in real time. *GPS Solutions*, 24(2), p. 1-13.

Dramm JR., 2004. Log sort yard economics, planning and feasibility. *US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*, 146.

Dumetz L., 2014. Modélisation des systèmes d'approvisionnement des scieries de bois de résineux en France et au Canada et propositions d'amélioration grâce aux technologies d'identification. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France.

Gaudreault, J., Forget, P., Frayret, J.M., Rousseau, A., Lemieux, S. and D'Amours, S., 2010. Distributed operations planning in the lumber supply chain : models and coordination. *International Journal of Industrial Engineering : Theory, Applications and Practice*, 17(3).

Gaudreault, J., Frayret, J.M., Rousseau, A. and D'Amours, S., 2011. Combined planning and scheduling in a divergent production system with co-production : A case study in the lumber industry. *Computers & Operations Research*, 38(9), p.1238-1250.

Marier, P., Gaudreault, J. et Robichaud, B., 2014. Implementing a MIP model to plan and schedule wood finishing operations in a sawmill : lessons learned. *10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM'2014)*, Nancy, France.

Marier, P., Gaudreault, J. et Noguer, T., 2016. Kiln Drying Operation Scheduling with Dynamic Composition of Loading Patterns. *Proceeding of the 6th International Conference in Information Systems Logistics and Supply Chain (ILS'2016)*, Bordeaux, France.

Müller, F., Jaeger, D. and Hanewinkel, M., 2019. Digitization in wood supply–A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, p. 206-218.

Murphy, G., Clark, J.A. et Pilkerton, S., 2012. Current and Potential Tagging and Tracking Systems for Logs Harvested from Pacific Northwest Forests. *Western Journal of Applied Forestry*, 27(2), p. 84-91.

Ogaja, C., 2016. Geomatics engineering : a practical guide to project design, *CRC Press*.

Pieskä S., Luimula M., Alaspää J., Pitkäaho, T. et Tervonen, J., 2009. Smart wheel loader based on RFID and positioning technologies. *In Proc the 8th International Conference and Workshop on Ambient Intelligence and Embedded Systems(AmiEs'2009)*, Funchal, Portugal.

Skoglund, M., Petig, T., Vedder, B., Eriksson, H. and Schiller, E.M., 2016. Static and dynamic performance evaluation of low-cost RTK GPS receivers. *In 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium* IV, p. 16-19.

Sun, Q.C., Odolinski, R., Xia, J.C., Foster, J., Falkmer, T. et Lee, H., 2017. Validating the efficacy of GPS tracking vehicle movement for driving behaviour assessment. *Travel Behaviour and Society*, 6, p. 32-43.

Team, G.P., 2017. Global positioning system (gps) standard positioning service (sps) performance analysis report. *GPS Product Team : Washington*, DC, USA.

Theresia, J., Widyadana, I.G.A. et Wahjudi, D., 2019. Optimal Kiln Dry Allocation for Dry Timber Preparation with Minimal Cost and Available Capacity. *Jurnal Teknik Industri*, 21(1), p. 43-48.

Tiberius CCJM. et Borre K., 2000. Are GPS data normally distributed. *Geodesy Beyond 2000*, p. 243-248.

Trzcianowska M., LeBel L. et Beaudoin D., 2019. Performance analysis of log yards using data envelopment analysis. *International Journal of Forest Engineering*, 30.2, p. 144-154.

US DoD, 2020. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard annexe A. *United States Coast Guard Navigation Center*, citesseer.

Williams, M. and Morgan, S., 2009. Horizontal positioning error derived from stationary GPS units : A function of time and proximity to building infrastructure. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 9(2), p. 275-280.

Wing, M.G., Eklund, A. et Kellogg, L.D., 2005. Consumer-grade global positioning system (GPS) accuracy and reliability. *Journal of forestry*, 103(4), p. 169-173.

Zandbergen PA., 2008. Positional accuracy of spatial data : Non-normal distributions and a critique of the national standard for spatial data accuracy. *Transactions in GIS*, 12(1), p. 103-130.

Zanjani, M.K., Nourelfath, M. et Aït-Kadi, D., 2011. Production planning with uncertainty in the quality of raw materials : a case in sawmills. *Journal of the Operational Research Society*, 62(7), p. 1334-1343.

Zanjani, M.K., Bajgiran, O.S. et Nourelfath, M., 2016. A hybrid scenario cluster decomposition algorithm for supply chain tactical planning under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 252(2), p. 466-476.

Zogg JM, 2009. GPS-Essentials of Satellite Navigation. *u-blox Holding AG*.

OPTIMAL MAINTENANCE POLICY FOR EQUIPMENT LEASED WITH WARRANTY

A. Ben Mabrouk
South Mediterranean University
Mediterranean School of Business, Mediterranean Institute of Technology
Centre de Recherche en Productique (CEREP), Tunisia
amel.benmabrouk@msb.tn

A. Chelbi
University of Tunis
National Higher Engineering School of Tunis (ENSIT)
Centre de Recherche en Productique (CEREP), Tunisia
anis.chelbi@planet.tn

ABSTRACT: *This paper presents a profit model for equipment leased with a warranty contract. During the warranty period, the lessor (who owns the equipment) performs and pays for repairs at failure and for preventive maintenance (PM) actions whenever the equipment reliability reaches a certain threshold. After the warranty expires, repairs and PM actions are still performed by the lessor, but they are billed to the lessee (who leases the equipment). Furthermore, in case the number of repairs exceeds a certain pre-specified value over the lease period, a penalty is supported by the lessor. This type of contract generates a profit for the lessor. A mathematical model is developed to determine the PM intervals, maximizing the expected total profit over the lease period. A numerical example is provided to demonstrate the effectiveness of the proposed model and a sensitivity analysis is carried out.*

KEYWORDS: *leasing, reliability, warranty, imperfect PM, minimal repair.*

1 INTRODUCTION

Nowadays, many businesses choose to lease equipment rather than buy them, mainly when dealing with expensive industrial, medical, mining, or transportation equipment. Furthermore, equipment is leased with a warranty contract which plays an important role in reassuring the lessees by offering them protection against early failures (Darghouth *et al.*, 2017). The warranty is known as a contractual obligation offered by a lessor, which begins at the start of equipment leasing and terminates at the end of the warranty period. The purpose of this obligation is to establish responsibility between the lessor and the lessee if the leased equipment breaks down. In a sense, it guarantees to the lessee that the equipment will perform its intended functions for a specified time (Bouguerra *et al.*, 2012). If it fails to do so, the lessor will repair (in case of minor failure) or replace (in case of catastrophic failure) the equipment during the warranty period at no cost or at a reduced cost to the lessee depending on the terms of the warranty contract. According to Darghouth *et al.* (2017), the warranty is also considered as a marketing tool to attract more customers since it reflects the quality and reliability of the equipment. In practice, a better warranty strategy generally means higher equipment quality and reliability. A review of major publications considering warranty policies can be found in Murthy and Djamaludin (2002), Wu (2012), and Wang and Xie (2018).

The equipment is not reliable in the sense that it eventually fails. In this context, the maintenance service is considered as the most important part to be negotiated between the lessor and the lessee under a lease contract. The purpose of this service is to keep equipment availability and reliability at an appropriate level (Shafiee and Chukova, 2013). In practice, warranties and maintenance are closely interlinked. Indeed, carrying out PM actions over the warranty period can help reducing the likelihood of failure and, therefore, the warranty servicing cost from the lessor's perspective (see Kim *et al.*, 2004, Darghouth *et al.*, 2017). From the lessee's point of view, PM efforts during the warranty period can have an important influence on the maintenance costs during the post-warranty period, which must be borne by the lessee. In the literature, the optimization of maintenance policies incorporating warranty coverage has received extensive attention; readers are referred to Kim *et al.* (2004), Chattopadhyay and Rahman (2008), Chien (2008, 2010), Shafiee and Chukova (2013), and Chien *et al.* (2019).

Because maintenance requires highly skilled labor and expensive tools, equipment lessee tends to outsource maintenance actions to the lessor (Ben Mabrouk *et al.*, 2019). In such situations, proposing an effective maintenance strategy as an integrated package under a lease contract is the responsibility of the lessor. The goal is to minimize the number of failures and associated penalties during the lease period. Numerous works have been published on optimal maintenance strategies to be adopted within a specified lease period (see Jaturonnatee *et al.*, 2006; Pongpech and Murthy, 2006; Pongpech *et al.*, 2006; Yeh and Chang, 2007; Yeh *et al.*, 2009; Yeh *et al.*, 2011; Chang and Lo, 2011; Schutz and Rezg, 2013; Zhou *et al.*, 2014; Ben Mabrouk *et al.*, 2016b; Ben Mabrouk *et al.*, 2017; Ben Mabrouk *et al.*, 2019). The above studies

focus on developing an optimal PM strategy without considering the product warranty.

In fact, the lessor generally offers a warranty for the leased equipment. So, it is worthwhile studying the PM policies during the warranty period. Notwithstanding the importance of warranty agreement, the works that incorporate the warranty contract into the optimization of maintenance policies for leased equipment are limited. Hajej *et al.* (2015) developed a mathematical model to study the opportunity provided to extend the warranty for the lessee. Hajej *et al.* (2016) developed a method to jointly optimize the production and maintenance plans for leased equipment under a warranty contract. Ben Mabrouk et al (2016a) proposed a model that determines the optimal levels of PM actions to be performed on a leased equipment between successive lease periods considering a given warranty period. Another type of problem that deals with leasing and warranty is studied by Wang *et al.* (2018). They proposed upgrade and PM strategies for industrial equipment during successive usage-based lease contracts with consideration of a warranty period. In these papers, the cost of PM actions is borne by the lessor or shared between the lessor and the lessee according to the contract adopted by both parties.

Our literature review exposes that all papers that consider the warranty within the lease period model the effect of imperfect PM using a single approach (failure intensity reduction or age reduction). There are no works considering the warranty for leased equipment using a hybrid PM model. Such a model, as the one developed by Lin *et al.* (2000), combines the age reduction model introduced by (Malik, 1979) and the failure rate increase model proposed by (Nakagawa, 1988). Several publications have used hybrid PM models either in or out of the context of leased equipment (see for instance Lin *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2007; Liao *et al.*, 2010; Khatab *et al.*, 2014).

Ben Mabrouk *et al.* (2017) is the only work having considered hybrid PM for leased equipment but without considering warranty. To the best of our knowledge, no research that integrates the warranty contract and maintenance policies in the context of equipment leasing involving hybrid PM actions has been reported. Hence, based on the results of our work in Ben Mabrouk *et al.* (2017), the goal of this paper is to determine the hybrid PM intervals maximizing the expected profit over the lease period from the lessor's perspective considering that warranty is offered in the lease contract.

The remainder of this study is organized as follows. Section 2 defines the proposed strategy. In Section 3, a mathematical model expressing the expected total profit over the lease period is developed. Section 4 presents a numerical example and a sensitivity analysis. Finally, the conclusion and some future research directions are given in the last section.

Throughout this paper, the following notation will be used:

$\lambda(t)$	initial failure rate of the equipment which is initially assumed to be a new one
$\Lambda(t)$	cumulative failure rate
L	lease period
w	warranty period
n	number of PM actions to be performed during L
n_w	number of PM actions to be performed during the warranty period w
n_{pw}	number of PM actions to be performed during the post-warranty period
j	ordinal of PM intervals, $j = 1, 2, \ldots, n$
T_j	length of the j^{th} PM interval, $j = 1, 2, \ldots, n$
τ_j	instant of the j^{th} PM action, $\tau_j = \sum_{i=1}^{j} T_i$
R_{th}	equipment reliability threshold that triggers a PM action
N_{max}	maximum number of failures allowed before a penalty has to be paid
$N(T_j)$	expected number of minimal repairs during the j^{th} PM interval
N	expected number of minimal repairs during L
N_w	expected number of minimal repairs during the warranty period
N_{pw}	expected number of minimal repairs during the post-warranty period
a_j	age reduction factor corresponding to the j^{th} PM action ($j = 1, 2, \ldots, n$)
b_j	failure rate increase factor corresponding to the j^{th} PM action ($j = 1, 2, \ldots, n$)
x	time interval between the last PM action and the end of the lease period L
P_r	expected total profit
C_M	expected warranty cost
C_P	expected penalty cost during the lease period L
Re_{pw}	expected revenue generated during the post-warranty
c_r	cost of a minimal repair following failure
c_f	penalty cost for each failure beyond a given contractual threshold
c_p	cost of a PM action
α_p	profit margin associated with each PM action performed
α_r	profit margin associated with each repair action performed

2 STRATEGY DEFINITION AND WORKING ASSUMPTIONS

In this work, we consider a repairable equipment leased for a period L with a warranty period w. Hence, the lessor gives the lessee a guarantee for the proper functioning of the equipment over the warranty period. Maintenance actions are delegated to the lessor and have negligible durations. The lessor has to prepare the terms of a maintenance service contract to be submitted and negotiated with the lessee. The lessor is then in charge of prescribing an effective maintenance strategy to keep the leased equipment functioning in an economical way. In order to reduce the frequency of failures, the contract

stipulates that a PM action is performed whenever the equipment reliability reaches a reliability threshold R_{th} over the lease period L (Figure 1). A PM action reduces the effective age of the equipment and changes the slope of the failure rate function simultaneously. Failures are minimally repaired keeping the equipment failure rate at nearly the same level as before failure. From the lessee's perspective, the equipment is maintained free of charge during the warranty period. However, he will have to support repairs and PM actions at his own expenses during the post-warranty period. In case the threshold number of failures are exceeded, penalty costs are always supported by the lessor. It is assumed that all costs are considered as known and constant. At the end of the lease period L, the equipment is returned to the lessor.

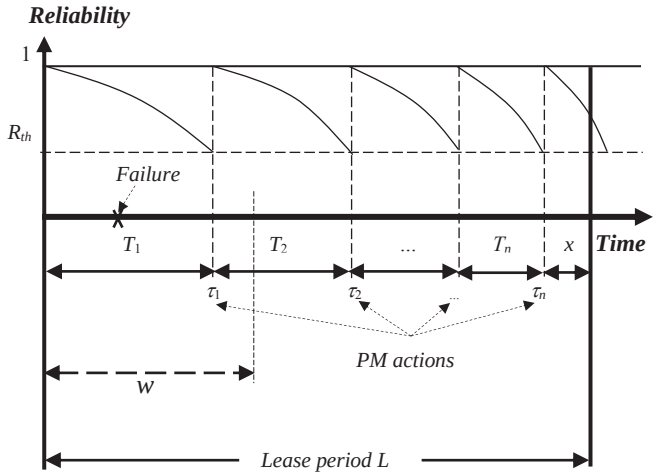


Figure 1: The maintenance policy during the lease period

Our objective is to find the PM intervals durations T_j* (j = 1, 2, …, n) corresponding to equipment's reliability threshold R_{th}* which maximize the expected total profit during the lease period considering the warranty.

3 MATHEMATICAL MODEL

Recall that a PM action is performed when the reliability of the equipment reaches a predetermined level R_{th}. Using a hybrid PM model means that, right after the j^{th} PM action, the failure rate function becomes $b_j\lambda_j(a_jT_j+t)$ when it was $\lambda_j(t)$ just before performing the j^{th} PM, where a_j ($0 \le a_j \le 1$) and b_j ($1 \le b_j$) are the age reduction factor and the failure rate adjustment factor respectively, and $t \ge 0$.

In this paper, we adopt the same modelling approach as in Khatab *et al.* (2014) and Ben Mabrouk *et al.* (2017) to determine the length of the j^{th} PM interval T_j (j = 1, …, n) corresponding to the reliability threshold R_{th}.
T_j can be obtained in the following recursive way:

$$T_j = \Lambda^{-1}\left(\Lambda(A_j) - \frac{\ln R_{th}}{B_j}\right) - A_j \quad \text{for } j = 1, 2, \ldots, n \qquad (1)$$

where

- $\Lambda(T_j) = \int_0^{T_j} \lambda_j(t)\,dt$ represents the cumulative failure rate in the j^{th} PM interval and $\Lambda^{-1}(.)$ is the inverse function of $\Lambda(.)$
- $A_j = \sum_{i=1}^{j-1} a_i T_i$ such that $A_1 = 0$ and $B_j = \prod_{i=1}^{j-1} b_i$ such that $B_1 = 1$

The expected total profit P_r is calculated by subtracting the expected warranty servicing cost C_M and the expected penalty cost C_P from the expected revenue Re_{pw} generated during the post-warranty period. It is given by the following expression:

$$P_r = Re_{pw} - C_M - C_P \qquad (2)$$

We develop below the terms of the expression of the lessor's expected total profit P_r during the lease period L with the consideration of the warranty period.

3.1 The expected revenue

The expected revenue Re_{pw} generated during the post-warranty period is obtained by calculating the sum of the expected revenue generated from the imperfect PM actions (the first term) and repairs (the second term) performed during the post-warranty period. It is expressed as follows:

$$Re_{pw} = n_{pw}c_p(1+\alpha_p) + N_{pw}c_r(1+\alpha_r) \qquad (3)$$

where $n_{pw} = n - n_w$ and $N_{pw} = N - N_w$

The number n of PM actions to be performed during L and the number n_w of PM actions to be performed during the warranty period w are determined using the numerical algorithm developed below (see figure 2).

In order to calculate the second term of equation (3), we need to compute the expected number N of minimal repairs (failures) during the lease period L. Following Ben Mabrouk *et al.* (2017), N can be obtained as follows:

$$N = \sum_{j=1}^{n} N(T_j) + B_n b_n \int_{A_n+a_nT_n}^{A_n+a_nT_n+x} \lambda(t)dt \qquad (4)$$

where $x = L - \sum_{j=1}^{n} T_j$

Equation (4) is equivalent to:

$$N = \sum_{j=1}^{n} B_j \int_{A_j}^{T_j+A_j} \lambda(t)\,dt + B_n b_n \int_{A_n+a_nT_n}^{A_n+a_nT_n+x} \lambda(t)dt \qquad (5)$$

This equation is composed of the sum of the expected number of minimal repairs during the n cycles and the expected number of minimal repairs during the time

interval between the last PM action and the end of the lease period L.

We also express the expected number N_w of minimal repairs during the warranty period by reasoning similarly to equation (5):

$$N_w = \sum_{j=1}^{n_w} B_j \int_{A_j}^{T_j+A_j} \lambda(t)\,dt + B_{n_w} b_{n_w} \int_{A_{n_w}+a_{n_w}T_{n_w}}^{A_{n_w}+a_{n_w}T_{n_w}+x_w} \lambda(t)dt \qquad (6)$$

where x_w stands for the time interval between the last PM action during the warranty period w and the end of the warranty period. It can be expressed as follows $x_w = w - \sum_{j=1}^{n_w} T_j$.

3.2 The expected warranty cost

The expected warranty cost C_M is given by:

$$C_M = n_w\, c_p + N_w\, c_r \qquad (7)$$

where the first term represents the total cost of the imperfect PM actions performed during the warranty period w and the second term expresses the expected total cost of repair actions during the warranty period.

3.3 The expected penalty cost

In case the number of failures exceeds a specified contractual threshold $N_{\max}$ during the lease period L, a penalty is incurred by the lessor.

Let ψ be the following binary variable:

$$\psi = \begin{cases} 1 : \text{if } N - N_{\max} > 0 \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

The expected penalty cost during the lease period is expressed as:

$$C_P = \psi\, c_f (N - N_{\max}) \qquad (8)$$

Hence, equation (2) can be rewritten as follows using equations (3), (7) and (8):

$$P_r = n_{pw} c_p \left(1+\alpha_p\right) + N_{pw} c_r (1+\alpha_r) - n_w\, c_p - N_w\, c_r - \psi c_f (N - N_{\max}) \qquad (9)$$

The numerical iterative algorithm presented below has been developed to determine the optimal strategy for any given set of input parameters. The optimal PM intervals T_j (j = 1, 2, …, n) can be obtained from equation (1). By maximizing the expected total profit P_r, the threshold R_{th}* for the optimal PM intervals can also be obtained.

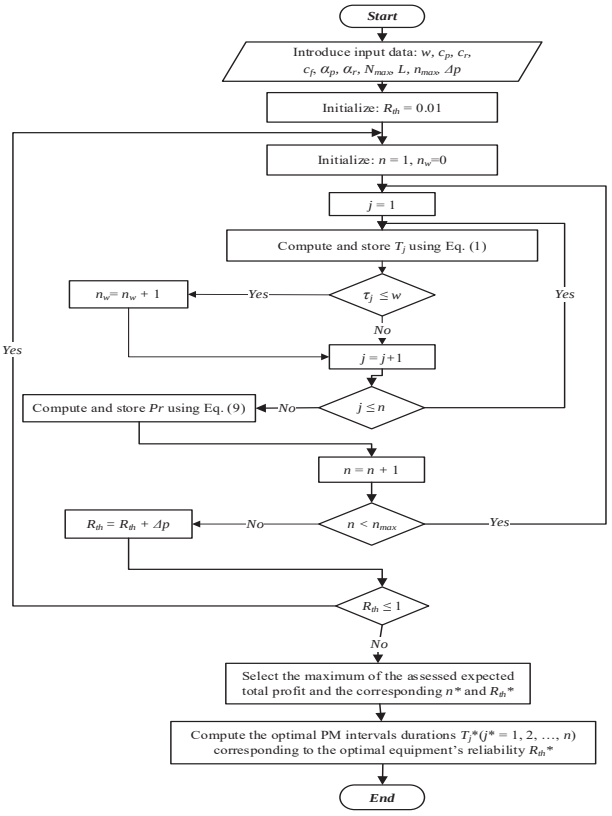


Figure 2: Numerical algorithm to find the optimal strategy

A numerical example is provided, in next section, in order to demonstrate the use of the proposed model and the numerical algorithm.

4 NUMERICAL EXAMPLE

The solving algorithm has been extensively tested with a large variety of input parameters. We present here one of the tested examples. We assume that the repairable equipment is leased for a period L=60 months. The improvement factors a_j and b_j are evaluated according to the following formulas (Mabrouk *et al.* 2017), as $a_j = \frac{j}{3j+7}$ and $b_j = \frac{12j+1}{11j+1}$ (j = 1, 2, . . ., n). We can see that a_j and b_j depend on the number of PM interventions performed.

The length of the warranty period may be influenced by the competition. In other words, due to increased competition, the lessor is obliged to provide to the lessee a warranty period w longer or equal to the warranty period offered on the market for similar leased equipment, even if this is done at the expense of a proportion of his profits (the maximum profit is obtained when w = 0).

The following input data presented in table 1 were arbitrarily selected. However, we consider rather realistic settings.

- Weibull distribution:	
Scale parameter	$\alpha = 21.5$
Shape parameter	$\beta = 3.5$
- Minimal repair cost	$c_r = 650$ \$
- PM action cost	$c_p = 50$ \$
- Penalty cost	$c_f = 350$ \$
- Maximum number of failures	$N_{max} = 1$
- Maximum number of PM actions	$n_{max} = 15$
- Warranty period	$w = 18$ months
- Profit margin associated with each PM action performed during the post-warranty period	$\alpha_p = 0.2$
- Profit margin associated with each repair action performed during the post-warranty period	$\alpha_r = 0.3$
- The search ranges of $R_{th} \in [0.01, 1]$ with a step $\Delta p = 0.01$	

Table 1: Costs and other input parameters

Looking at figure 3, we can see that the higher the reliability threshold R_{th}, the greater the number n of PM actions. Thus, in order to keep the reliability of the equipment high, more frequent PM actions must be performed. Also, for a high value of R_{th}, n increases since the threshold is quickly reached. This results in an important PM cost. On the other hand, a low value of R_{th} implies a prolonged and uninterrupted use of the equipment generating, as a result, an increased risk of failures yielding an increase in the number of repairs. The problem is to find a trade-off between the reliability threshold R_{th} and the number n of PM actions in order to maximize the expected total profit over the five-year lease period.

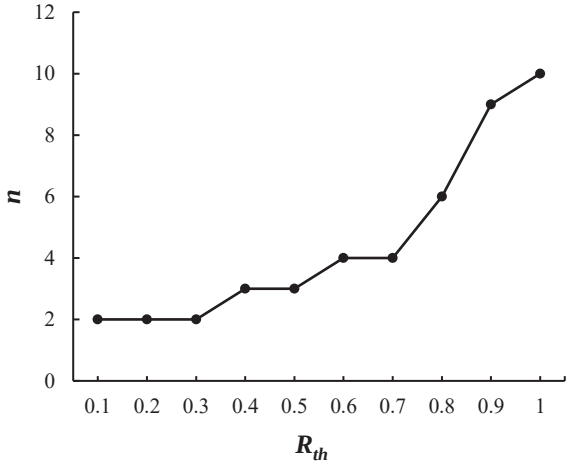


Figure 3: The effect of the reliability threshold R_{th} on the number of PM actions n

Based on the input data presented in table 1 and the proposed algorithm, the highest expected total profit P_r^* over the five years lease period is equal to 790.6 \$ and the optimal number of PM actions n^* is equal to 4. Obviously, this result is obtained when the equipment reliability threshold R_{th}^* is set to 59 %.

Table 2 below provides the various components of the profit over the 5 years with $w = 18$ months.

- The expected revenue	$Re_{pw} = 1610.9$
- The expected warranty cost	$C_M = 393$
- The expected penalty cost	$C_P = 427.3$

Table 2: The various components of profit (\$)

Once the reliability threshold R_{th}^* is obtained, we can easily determine the optimal PM intervals using equation (1). We recall that the equipment should undergo a PM action whenever its reliability reaches the value $R_{th}^* = 0.59$. Figure 4 shows that the first imperfect PM action must be performed at $T_1^* = 17.9$ months. The second PM should be performed after $T_2^* = 15.7$ months and so on. We can clearly note that the hybrid maintenance policy based on the reliability threshold reduces PM intervals over time.

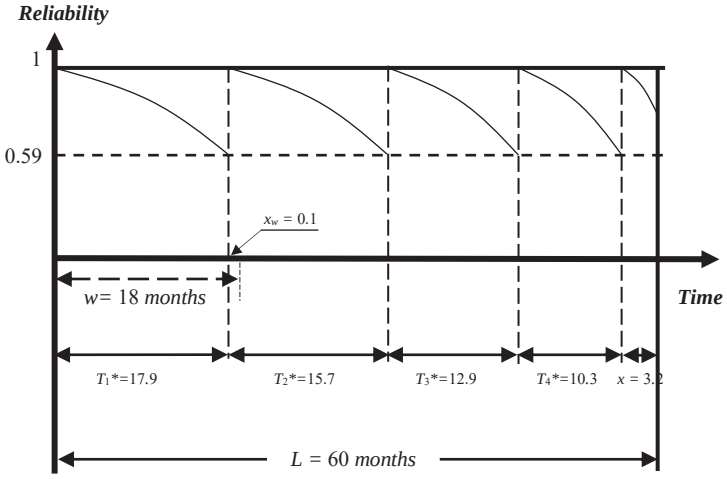


Figure 4: The obtained optimal maintenance strategy

We studied the effect of the variation of the warranty period on the expected total profit P_r. Recall that all the performed repairs and PM actions are borne by the lessor during the warranty period and charged to the lessee during the post-warranty period. Looking at table 3 below, one can notice that when the warranty period increases, the expected total profit decreases. One can also see that from the lessor perspective, the maximum profit is determined in the case where $w = 0$. However, the lessor is obliged to offer to the lessee a warranty period w to encourage him to lease the equipment. It is also interesting to observe that the lessor should not offer a warranty period longer than two years beyond which the profit would turn to a loss (we reach zero profit when w is equal to 24.5 months).

w	**0**	**6**	**12**	**18**	**24**	**30**
R_{th}^*	0.81	0.81	0.81	**0.59**	0.24	0.04
n^*	6	6	6	**4**	2	2
T_1^*	13.8	13.8	13.8	**17.9**	23.8	30
T_2^*	12.1	12.1	12.1	**15.7**	20.9	26.4
T_3^*	9.9	9.9	9.9	**12.9**		
T_4^*	7.9	7.9	7.9	**10.3**		
T_5^*	6.2	6.2	6.2			
T_6^*	4.8	4.8	4.8			
P_r^*	1490.7	1473.5	1296.5	**790.6**	120.7	-1105.5

Table 3: Impact of the variation of the warranty period on the optimal PM policy

5 CONCLUSION

In this work, a profit model based on a hybrid PM strategy for leased equipment during a finite lease period including warranty has been developed. The lessor performs imperfect PM actions whenever the equipment reliability reaches a certain prespecified threshold. To determine the optimal PM intervals durations, which maximize the lessor's profit, a mathematical model and a solving algorithm have been developed. A numerical example and a sensitivity study of the effect of the variation of the warranty period on the optimal maintenance policy have been presented and discussed. It has been clearly shown that when the warranty period increases, the expected total profit decreases.

For future investigation, this work can be extended to other types of warranty policies (free-replacement warranty, pro-rata warranty, etc.). Regarding the maintenance policy, more realistic settings can be considered: PM and repairs with non-negligible durations and in case a repair duration exceeds a certain pre-specified value, a penalty cost is incurred.

REFERENCES

Ben Mabrouk, A., A. Chelbi, and M. Radhoui, 2016a. Optimal imperfect preventive maintenance policy for equipment leased during successive periods. *International Journal of Production Research*, 54(17), p. 5095-5110.

Ben Mabrouk, A., A. Chelbi, and M. Radhoui, 2016b. Optimal imperfect maintenance strategy for leased equipment. *International Journal of Production Economics*, 178, p. 57-64.

Ben Mabrouk, A., A. Chelbi, and M. Radhoui, 2017. Optimal hybrid imperfect preventive maintenance policy for leased equipment. *The 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, July, Toulouse, France, p. 1-6.

Ben Mabrouk, A., A. Chelbi, L. Tlili, and M. Radhoui, 2019. A quasi-optimal inspection strategy for leased equipment. *International Journal of Production Research*, 58(3), p. 878-892. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1602743.

Bouguerra, S., A. Chelbi, and N. Rezg, 2012. A decision model for adopting an extended warranty under different maintenance policies. *International Journal of Production Economics*, 135(2), p. 840-849.

Chang, W. and H. Lo, 2011. Joint determination of lease period and preventive maintenance policy for leased equipment with residual value. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), p. 489-496.

Chattopadhyay, G., and A. Rahman, 2008. Development of lifetime warranty policies and models for estimating costs. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(4), p. 522-529.

Chien, Y. H., 2008. A new warranty strategy: Combining a renewing free-replacement warranty with a rebate policy. *Quality and Reliability Engineering International,* 24(7), p. 807-815.

Chien, Y. H., 2010. Optimal age for preventive replacement under a combined fully renewable free replacement with a pro-rata warranty. *International Journal of Production Economics,* 124(1), p. 198-205.

Chien, Y. H., Z. G. Zhang, and X. Yin, 2019. On optimal preventive-maintenance policy for generalized polya process repairable products under free-repair warranty. *European Journal of Operational Research*, 279 (1), p. 68-78.

Darghouth, M. N., A. Chelbi and D. Ait-kadi, 2017. Investigating reliability improvement of second-hand production equipment considering warranty and preventive maintenance strategies. *International Journal of Production Research,* 55 (16), p. 4643-4661. DOI: 10.1080/00207543.2016.1277277.

Hajej, Z., N. Rezg, and A. Gharbi, 2015. A Decision Optimization Model for Leased Manufacturing Equipment with Warranty under Forecasting Production/Maintenance Problem. *Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2015, Article ID 274530, 14 pages.

Hajej, Z., N. Rezg, and A. Gharbi, 2016. An optimal production/maintenance strategy under lease contract with warranty periods, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 22(1), p. 35-50.

Jaturonnatee, J., D. Murthy, and R. Boondiskulchok, 2006. Optimal preventive maintenance of leased equipment with corrective minimal repairs. *European Journal of Operational Research*, 174(1), p.201-215.

Khatab, A., D. Ait-Kadi, and N. Rezg, 2014. Availability optimisation for stochastic degrading systems under imperfect preventive maintenance. *International Journal of Production Research*, 52(14), p. 4132-4141.

Kim, C. S., I. Djamaludin, and D. N. P. Murthy, 2004. Warranty and discrete preventive maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 84(3), p. 301-309.

Liao, W., E. Pan, and L. Xi, 2010. Preventive maintenance scheduling for repairable system with deterioration. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(6), p. 875-884.

Lin, D., M. Zuo, and R. Yam, 2000. General sequential imperfect preventive maintenance models. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 7(3), p.253-266.

Lin, D., M. Zuo, and R. Yam, 2001. Sequential imperfect preventive maintenance models with two categories of failure modes. *Naval Research Logistics*, 48(2), p. 172-183.

Malik, M., 1979. Reliable Preventive Maintenance Scheduling. *A I I E Transactions*, 11(3), p. 221-228.

Murthy, D. N. P., and I. Djamaludin, 2002. New Product Warranty: A Literature Review. *International Journal of Production Economics*, 79 (3), p. 231-260.

Nakagawa, T., 1988. Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability*, 37(3), p. 295-298.

Pongpech, J. and D. Murthy, 2006. Optimal periodic preventive maintenance policy for leased equipment. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(7), p. 772-777.

Pongpech, J., D. Murthy, and R. Boondiskulchock, 2006. Maintenance strategies for used equipment under lease. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12(1), p. 52-67.

Shafiee, M., and S. Chukova, 2013. Maintenance models in warranty: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 229(3), p. 561-572.

Schutz, J. and N. Rezg, 2013. Maintenance strategy for leased equipment. *Computers & Industrial Engineering*, 66(3), p. 593-600.

Wang, X., L. Lishuai, and X. Min, 2018. Optimal preventive maintenance strategy for leased equipment under successive usage-based contracts. *International Journal of Production Research,* 57(18), p. 5705-5724. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1542181

Wang, X., and W. Xie, 2018. Two-dimensional Warranty: A Literature Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O Journal of Risk and Reliability*, 232(3), p. 284-307.

Wu, S. 2012. Warranty Data Analysis: a Review. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(8), p. 795-805.

Yeh, R. and W. Chang, 2007. Optimal threshold value of failure-rate for leased products with preventive maintenance actions. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(5-6), p. 730-737.

Yeh, R., K. Kao, and W. Chang, 2009. Optimal preventive maintenance policy for leased equipment using failure rate reduction. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), p. 304-309.

Yeh, R., K. Kao, and W. Chang, 2011. Preventive-maintenance policy for leased products under various maintenance costs. *Expert Systems with Applications*, 38(4), p. 3558-3562.

Zhou, X., L. Xi, and J. Lee, 2007. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(4), p. 530-534.

Zhou, X., Y. Li, L. Xi, and J. Lee, 2014. Multi-phase preventive maintenance policy for leased equipment. *International Journal of Production Research*, 53(15), p. 4528-4537.

AVANTAGES POTENTIELS DU REVERSE BLENDING SUR LA CHAINE LOGISTIQUE DE L'INDUSTRIE DES ENGRAIS

[1,2]L. BENHAMOU, [1,2]P. FÉNIÈS

[1]EMINES - School of Industrial Management, UM6P, Benguerir, Maroc
[2] Université Panthéon Assas Paris II, Paris, France
{latifa.benhamou, pierre.fenies}@emines.um6p.ma

[1,3]V. GIARD

[3]Université Paris-Dauphine, Université PSL Research, Paris, France
vincent.giard@emines.um6p.ma
vincent.giard@dauphine.psl.eu

RÉSUMÉ : *La différenciation retardée, l'une des techniques clés de la personnalisation de masse, s'est avérée être une stratégie de haute performance dans l'industrie de production discrète. Dans l'industrie de production continue, elle reste mal explorée, surtout lorsque la différenciation intervient aussi sur la composition du produit et non pas seulement sur sa forme. Le Reverse Blending est un nouveau problème de mélange de la recherche opérationnelle basé sur une formulation quadratique, où les exigences des outputs sont similaires à celles du blending classique, mais où les inputs ne sont pas préexistants et doivent être définis simultanément avec leur utilisation dans le processus de mélange, tout en répondant exactement aux exigences des outputs. Le Reverse Blending peut être utilisé pour obtenir une grande variété d'engrais personnalisés (outputs) à partir d'un petit nombre d'inputs pouvant être mélangés à l'extérieur de l'usine chimique, près des utilisateurs finaux. Cette solution permettrait de remplacer la production d'une grande variété de petits lots de produits finis par celle d'un petit nombre de grands lots de produits intermédiaires, permettant une rationalisation logistique précieuse et des économies substantielles. Cet article propose une étude de cas de l'impact potentiel du Reverse Blending sur la chaîne logistique de l'industrie des engrais.*

MOTS-CLÉS : *Chaine logistique, Recherche Opérationnelle, Innovation, Gestion de Production, Reverse Blending, Différenciation retardée*

1 INTRODUCTION

Maximiser les rendements des variétés agricoles tout en préservant la fertilité des sols est essentiel pour pouvoir assurer la sécurité alimentaire et accompagner la croissance démographique. À cette fin, la concentration du sol en éléments nutritifs doit être optimale pour que ces derniers soient utilisés de manière efficace (Incrocci et al., 2017). Pour ce faire, il faut recourir à des formules d'engrais personnalisées dont les nutriments et les proportions diffèrent selon les caractéristiques pédologiques et les cultures agricoles. En plus des nutriments majeurs (azote N, phosphore P et potassium K), ces engrais peuvent être complétés par plusieurs nutriments secondaires (par exemple, le soufre) et/ou micronutriments (par exemple, le zinc), ce qui peut se traduire par des centaines, voire des milliers de formules d'engrais. Pour un fabricant d'engrais, cela revient à : *i)* produire un grand nombre de différents lots d'engrais personnalisés sur des lignes de production à flux continue, et *ii)* relever un défi majeur qui est celui de gérer la production, le stockage et la distribution d'une grande variété de produits finis.

Dans le contexte de la production continue, la performance de la production et de la distribution d'une grande variété de produits ne peut être optimale car elle accroît significativement les coûts directs de la main-d'œuvre et des matériaux, les frais généraux de fabrication, le délai de livraison et les niveaux de stock (Salvador et al., 2002). En ce qui concerne la production discrète, des études bibliographiques approfondies sont disponibles quant à l'organisation industrielle la plus appropriée pour gérer une grande variété de produits. Par exemple, dans une étude de 60 articles (dont 80 % concernent une production discrète et 20 % concernent le secteur des services), Reis et al. (2013) ont identifié sept stratégies capables d'atténuer les effets négatifs de la variété des produits. La stratégie la plus fréquente consiste à utiliser des composants communs (Reis et al., 2013). Selon Johnson et Kirchain (2009), ceci s'avère être le moyen le plus efficace pour réduire les coûts. Cette stratégie, également connue sous le nom de la standardisation, est communément associée à la Différenciation Retardée (DR). Cette dernière vise à retarder les processus de différenciation en retardant la combinaison des produits communs aussi tard que possible afin que la chaîne logistique atteigne son rapport coût-efficacité (Boone et al., 2007). Dans la production discrète, DR fait référence à la production successive de différents produits obtenus en assemblant des composants alternatifs sur une chaîne de montage permettant des milliers de combinaisons de produits avec un niveau élevé de réactivité (par exemple, l'industrie automobile).

À notre connaissance, aucune recherche n'a jamais été menée sur la gestion d'une très grande diversité dans la production continue, sauf là où cette diversité provient de la personnalisation de la forme et/ou le conditionnement (par exemple, emballage dans l'industrie du café (Van Hoek, 2011) ou forme/coupe de produits dans l'industrie sidérurgique (Kerkkänen, 2007)). Nous pensons que, dans l'industrie continue, le Reverse Blending

(RB) (une extension du mélange classique où les inputs doivent être définis), peut-être une approche disruptive efficace pour mettre en œuvre une différenciation retardée efficace en ajoutant à un simple emballage une dimension concernant la composition interne du produit (Benhamou et al., 2019). En montrant son impact sur l'organisation de la Supply Chain (SC), notre article traite des avantages potentiels du RB pour les producteurs d'engrais qui seraient prêts à restructurer leur chaine logistique.

À la suite de cette brève introduction, notre article est structuré comme suit : la section 2 décrit les principes fondamentaux du RB avant de discuter en section 3, les avantages potentiels d'une organisation basée sur le RB; la section 4 présente les principales conclusions de notre étude de cas et, pour conclure, la section 5 met en évidence des pistes importantes pour les futures recherches.

2 PRINCIPES FONDAMENTAUX DU REVERSE BLENDING

Pour atteindre une grande variété d'engrais personnalisés, le RB cherche les spécifications chimiques optimales du plus petit ensemble – appelé « Base Canonique (BC) » – d'inputs de mélange – appelés « Composites de la Base Canonique (CBC) » – dont les combinaisons de mélange forment une nomenclature à utiliser pour produire toute quantité de tout output appartenant à la variété d'engrais à l'étude (Benhamou et al., 2019). D'autres nouvelles formules d'engrais supplémentaires peuvent être obtenues à partir de ces CBC par un problème linéaire classique de mélange visant à minimiser les écarts par rapport aux spécifications exactes de ces formules. En termes de RO, le RB est un nouveau problème de mélange mono-étage dont les caractéristiques des inputs (CBC) sont des variables de décision par opposition au blending classique où les spécifications des inputs sont des paramètres d'entrée. La revue de littérature, présentée dans (Benhamou et al., 2019), démontre l'originalité de cette approche par rapport aux problèmes de mélange traités dans diverses industries (secteurs agroalimentaire, minier, pétrolier et chimique) et l'industrie des engrais en particulier.

Étant non préexistants, certains CBC peuvent devoir être créés de toutes pièces, et des expériences en laboratoire peuvent donc être nécessaires pour obtenir des réactions chimiquement stables pour le développement des nouvelles formules cibles. Une alternative consiste à produire les CBC en mélangeant les composites préexistants disponibles sur le marché. Cette approche constitue un problème de mélange à deux étages dont les composites existants sont mélangés pour obtenir les CBC (premier étage) et dont les CBC sont mélangés pour obtenir les engrais personnalisés (deuxième étage). Cette méthode, appelée Problème de Pooling Adapté (PPA), diffère du Problème de Pooling (PP), qui fait également référence à des problèmes de mélange multi-étages (Chang et al., 2019). Les raisons de cette différence, énoncées dans (Benhamou et al., 2019), comprennent le fait que les spécifications chimiques des composites existants peuvent interdire l'utilisation simultanée de certains d'entre eux dans la production d'un CBC, empêchant ainsi la combinaison libre de tous les CBC dans la production d'un engrais ; les différences entre les modèles PPA et PP sont décrites dans (Benhamou et al., 2019). Compte tenu de ces contraintes chimiques, il est très probable qu'un certain nombre des composites considérés ne conviennent pas pour produire une BC capable de satisfaire tous les besoins en engrais. Nous avons donc opté pour une version étendue du RB consistant à produire un sous-ensemble des CBC en mélangeant les composites existants par PPA tout en complétant la fabrication du sous-ensemble restant par RB.

Indépendamment de la façon dont les CBC sont créés, cette approche permet une concentration massive des flux car elle peut réduire les flux à gérer de 100 % à seulement 1 % comme le montrent les résultats de notre étude de cas rapportée dans (Benhamou et al., 2019) où 700 solutions d'engrais pourraient être fournies avec pas plus de 10 CBC.

3 LES AVANTAGES POTENTIELS DU REVERSE BLENDING

Un producteur d'engrais qui utiliserait le RB bénéficierait d'un mode de production dans lequel très peu de CBC (produits communs) seraient produits sur son site de production avant d'être expédiés vers des unités de blending situées à proximité des consommateurs finaux, où tout engrais personnalisé pourrait être obtenu en mélangeant les CBC communs selon la nomenclature appropriée. Lorsque l'on considère l'ensemble de la SC (du fournisseur à l'agriculteur), ce mode de production est basé sur une combinaison de politiques « Production Pour Stock (PPS) », à l'usine du producteur, et « Production À la Commande (PAC) », en réponse à des commandes spécifiquement personnalisées.

Les conclusions d'analyses bibliographiques comparant la PPS, la PAC et la PPS/PAC hybride sont les suivantes. En général, la PPS est utilisée lorsque la production peut être basée sur des prévisions de la demande (Kerkkänen, 2007 ; Sharda et Akiya, 2012), ce qui conduit généralement à peu de produits standards à faible coût. Si cette approche permet de rationaliser les coûts de production, de réduire les délais de livraison aux clients, d'augmenter la capacité de production et de réduire les coûts liés aux temps de lancement, peu de systèmes productifs utilisent pleinement la PPS. Cela s'explique par le fait que pour rester compétitives, les industries doivent désormais répondre aux attentes des clients (Kerkkänen, 2007). En revanche, la PAC, qui consiste à lancer la production à la demande des clients en acceptant de livrer une assez grande variété de produits, induit des délais de livraison plus longs pour les clients et des coûts de changement de séries plus élevés (Gupta et Benjaafar, 2004). Une dernière solution consiste à combiner ces deux approches dans un système hybride PPS/PAC, impliquant une approche hiérarchique (par exemple, priorité à la PAC et

recours à la PPS pour la capacité restante (Agra et al., 2018), ou stockage de produits semi-finis dans un entrepôt intermédiaire (PPS) puis assemblage en fonction des commandes des clients (PAC) (Sharda et Akiya, 2012 ; Gupta et Benjaafar, 2004 ; Morikawa et al., 2014).

Le choix de la stratégie de production optimale est influencé par plusieurs facteurs qui dépendent des caractéristiques des produits, des processus et du marché (Van Hoek, 2011) : par exemple, industrie discrète/continue, variété de produits, expiration/contamination des produits, compétitivité du marché, structure de la SC, procédés flexibles/rigides, etc. Cependant, comme l'affirment de nombreux chercheurs (Sharda et Akiya, 2012 ; Gupta et Benjaafar, 2004 ; Soman et al., 2004 ; Jewkes et Alfa, 2009), lorsque le contexte industriel est propice, le mode de production le plus efficace est l'approche hybride PPS/PAC qui peut permettre de fournir des produits personnalisés avec un délai d'exécution des commandes des clients plus court (Jewkes et Alfa, 2009). L'idée est de développer des approches *Lean* basées sur l'efficacité, l'élimination des déchets, la réduction des coûts dans les phases amont de la SC, et de concevoir des processus agiles qui permettent de répondre rapidement aux changements de la demande en temps réel dans les phases aval (Fornasiero et al., 2015). Pour ce faire, de nombreux chercheurs considèrent la DR comme la meilleure option (Van Hoek, 2011; Sharda et Akiya, 2012 ; Gupta et Benjaafar, 2004 ; Jewkes et Alfa, 2009). La DR s'est avérée très pertinente dans la production discrète (par exemple, Hewlett Packard a fait état d'économies à deux chiffres sur les coûts logistiques en appliquant la DR (Van Hoek, 2011)). En revanche, dans l'industrie continue, elle est plus difficile à mettre en œuvre. Ceci est dû au fait que les processus de transformation chimique ne peuvent être découplés à un stade intermédiaire (Van Hoek, 2011), comme c'est le cas dans l'industrie discrète où le produit fini peut se décomposer en plusieurs sous-modules assemblés à la commande.

La difficulté consiste en fait à trouver des points communs entre différentes variétés de produits afin de pouvoir concevoir une plateforme commune à laquelle des briques spécifiques peuvent être ajoutées pour obtenir des produits personnalisables pour des segments bien spécifiques (Tyagi, 2015). En outre, dans l'industrie continue, lorsque la personnalisation affecte la composition interne d'un produit et n'est pas un simple problème d'emballage/étiquetage, il devient difficile de reporter le point de différenciation des produits aux étapes en aval de la SC, ce qui limite la flexibilité et la réactivité à la demande des clients (Benhamou et al., 2019).

Dans l'industrie des engrais, le RB est une solution qui permet de surmonter ces difficultés car : *i)* il fournit une plateforme commune solide qui peut servir une base étendue d'engrais personnalisés ; *ii)* il garantit une DR efficace et efficiente puisque la différenciation peut être effectuée à proximité des agriculteurs, plutôt que sur les sites de production, dans de petites unités de blending qui peuvent produire, à des coûts similaires (par un processus commun de mélange), tout engrais requis en utilisant la formule appropriée des CBC. Le RB peut ainsi devenir un levier clé pour la mise en œuvre réussie d'un système hybride PPS/PAC dans les industrie de process.

Avec une configuration basée sur le RB, au niveau de l'usine chimique, la production est pour stock et implique très peu de CBC. En plus d'exploiter la principale force de la PAC, grâce à une grande réactivité et à la prévention des pertes de ventes, la transformation organisationnelle requise par le RB offre plusieurs avantages. Elle simplifie le système de production car elle permet un flux continu sans (ou avec très peu) de changements de séries sur les lignes de production. En effet, comme les changements de séries peuvent entraîner des charges importantes dans les usines chimiques (par exemple, pertes de produits et de temps, consommation supplémentaire d'eau et d'énergie, création d'eaux usées, utilisation de produits chimiques à des fins de nettoyage, etc. (Gungor et Evans, 2017)), la réduction des temps de lancement est très importante pour répondre à la demande des clients et atteindre les objectifs de productivité (Karam, 2018; Gungor et Evans, 2017 ; Ferradás et Salonitis, 2013; Meixell, 2005). Une production en flux continu d'un nombre réduit de CBC (un/deux CBC par ligne de production) améliorerait donc considérablement la performance des lignes de production par rapport à une production en flux tiré impliquant de petites quantités d'une grande diversité de produits (par exemple, Grundermann et al. (2012) ont évalué l'impact de la transformation d'une production discontinue en production continue et ont conclu que cette transformation pourrait réduire l'utilisation de détergent et d'eau jusqu'à 95 %). La suppression des arrêts dus aux temps de lancement permettrait également d'augmenter la capacité de production et d'éviter de perdre des parts de marché au profit des concurrents.

Par ailleurs, il est admis que la production pour stock entraîne des coûts de stockage élevés et comporte des risques que les commandes prévues ne se concrétisent pas (Agra et al., 2018 ; Karasu et al., 2014). RB élimine presque ces risques puisque les quelques CBC à stocker sont censés correspondent à une plateforme commune universelle pour tout engrais sur mesure, ce qui va assurer une forte demande pour ces CBC.

Le RB simplifierait également la gestion des hangars de stockage (un ou deux CBC par hangar), éliminant ainsi les problèmes de stockage découlant d'une diversité accrue (espace vacant en raison de petits lots de production, engrais contaminés en raison d'une mauvaise séparation des différents produits, arrêt de la production en raison de la saturation des stocks, etc.)

Au niveau des expéditions, la standardisation liée au RB simplifierait les opérations d'acheminement en facilitant la séparation des flux (puisque les mêmes CBC sont utilisés pour tous les clients), réduirait les coûts liés au processus de nettoyage des convoyeurs, ainsi que les coûts de livraison et tous les problèmes liés au chargement des engrais sur les navires, pour n'en citer que quelques-uns.

D'un point de vue commercial, le RB garantirait une grande flexibilité et une grande réactivité à la demande

de chaque client car la différenciation serait effectuée : *i)* à proximité des agriculteurs et *ii)* par un simple processus de mélange dans des unités de blending probablement déjà existantes. Il convient de noter que le blending reporté est en effet déjà utilisé, mais avec des résultats peu satisfaisants : il se limite au mélange de quelques engrais existants qui ne répondent pas vraiment à la totalité des besoins en éléments nutritifs. En bref, le RB améliorerait considérablement la satisfaction des clients et augmenterait la base de clientèle, d'autant plus que cette personnalisation serait plus rentable que la personnalisation basée sur la PAC. En plus de ces avantages économiques, la RB préserverait la fertilité des sols à long terme, garantissant ainsi une agriculture durable et la sécurité alimentaire mondiale.

4 ÉTUDE DE CAS

4.1 Description

Le groupe OCP, l'un des leaders mondiaux dans le secteur des engrais, cherche à accroître sa part du marché mondial des engrais et à conquérir de nouveaux clients en leur offrant des solutions d'engrais personnalisées. Accroître la diversité de son portefeuille de produits est une stratégie que le groupe OCP poursuit depuis de nombreuses années. En effet, depuis 2000, le groupe OCP a décuplé la variété de ses engrais et vend aujourd'hui environ 50 engrais. La figure 1 souligne l'évolution du nombre des engrais produits par OCP depuis 2000.

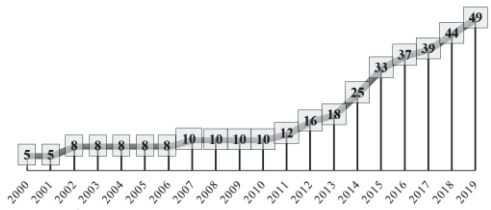


Figure 1: Évolution du nombre d'engrais OCP depuis 2000.

Cette diversité croissante améliore l'agilité et la flexibilité, et conforte le leadership du groupe. Cependant, dans une approche dominée par la PAC, plus la diversité est grande, plus il est difficile de gérer la production, le stockage et la distribution. L'objectif de notre étude de cas est alors de montrer que les problèmes liés à la diversité produite par OCP pourraient être résolus par le RB à travers le passage d'une PAC à une PPS. À cette fin, nous partons du programme de production journalière de l'OCP en 2019 et cherchons la composition optimale des CBC qui satisferaient ce programme de production.

En 2019, le carnet de commandes d'OCP comprenait 28 engrais dont la production globale sur 7 lignes de production est fournie dans le fichier Annual_Production.xlsx inclus dans le lien Mendeley (http://dx.doi.org/10.17632/zfp6nzy87w.1) utilisé pour stocker nos grandes tables afin de conserver le texte dans le format prescrit. Nous avons d'abord appliqué le modèle RB à cet ensemble de données annuelles avant d'analyser ses résultats sur un maillage mensuel. La production mensuelle de l'OCP est indiquée dans le fichier Monthly_Production.xlsx.

4.2 Résultats

L'application du RB aux 28 engrais différents a révélé qu'ils peuvent tous être produits en utilisant seulement 8 CBC. Il convient de souligner que les résultats qui suivent visent à montrer la réduction de la complexité de la production et du stockage en répondant à la demande avec seulement une dizaine de CBC, sachant qu'avec une dizaine de CBC, il est possible de répondre à la demande de plusieurs centaines d'engrais.

Le tableau 1 décrit la composition chimique de chaque CBC en termes de N, P, K, B_2O_3, Zn et de *filler* (un composant neutre ajouté à des fins de stabilisation chimique n'ayant aucun impact sur la structure nutritionnelle).

	Composites de la Base Canonique (CBC)								
	CBC 1	CBC 2	CBC 3	CBC 4	CBC 5	CBC 6	CBC 7	CBC 8	*filler*
%N	46,00%	11,86%	12,70%	19,00%	0%	2,34%	2,14%	0%	0%
%P	0%	56,08%	16,11%	38,00%	0%	56,00%	56,00%	51,24%	0%
%K	0%	0%	16,11%	0%	63,60%	0%	0%	0%	0%
%S	0%	0%	0%	7,00%	25,27%	11,78%	7,06%	19,67%	0%
%B2O3	0%	0%	0%	0%	6,13%	3,15%	0%	0%	0%
%Zn	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7,79%	0%
filler	54,00%	32,06%	55,07%	36,00%	5,00%	26,72%	34,81%	21,30%	100%

Tableau 1: Composition optimale des CBC

En plus d'identifier les CBC, RB indique les quantités de chaque CBC nécessaires pour produire le volume exact requis pour chaque engrais et pour satisfaire leur composition chimique précise (voir les détails de cette solution dans le fichier RB_Annual_Results.xlsx). Il convient de rappeler que le *filler* doit être utilisé en combinaison avec les CBC pour obtenir les quantités souhaitées.

4.2.1 Résultats annuels

Une étude plus approfondie des résultats montre que le volume de production annuel du groupe OCP, soit 4 440 150 tonnes, comprenant 28 engrais (voir les parts correspondantes en % dans la partie gauche de la figure 2) peut être entièrement obtenu en produisant seulement 4 290 687 tonnes réparties sur 8 CBC (voir la part en % de chaque CBC dans la partie droite de la figure 2) dont les quatre premiers représentent plus de 96 % de la production totale.

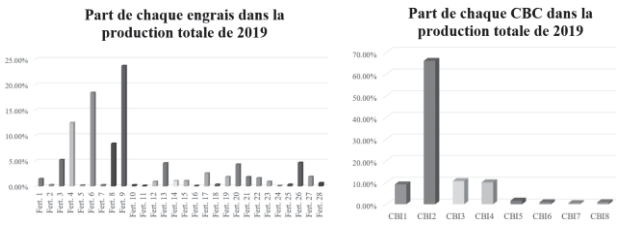


Figure 2 : Production actuelle de l'OCP vs. Production basée sur le RB.

La massification des flux ci-dessus aurait été encore plus importante si nous nous étions face à une variété plus grande que 28 engrais. Dans (Benhamou et al., 2019), le RB répondait aux exigences de plus de 480 formules NPK avec un maximum de dix CBC. Nous croyons cependant qu'avec l'accent mis aujourd'hui sur l'agriculture de précision, en particulier en Afrique, l'OCP devra accroître considérablement la diversité de son portefeuille au cours des prochaines années et la contribution du RB sera à ce moment-là plus révélatrice.

4.2.2 Résultats mensuels

L'intérêt du RB est encore plus évident sur la base des résultats mensuels. En effet, en adoptant le système productif actuel (voir la figure 3), nous observons que la diversité des produits et les volumes de production varient d'un mois à l'autre et que les volumes correspondent à de petits lots (le système de production étant alimenté par des commandes réelles (PAC)).

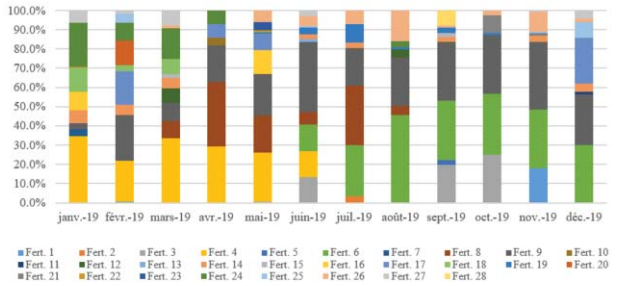


Figure 3: Part des engrais dans la production mensuelle globale de l'OCP

Les différentes couleurs (pour chaque référence d'engrais différente) dans chaque bâton (production mensuelle globale) illustrent la diversité et fournissent une indication quant au nombre de changements de séries qui ont dû être effectués sur les lignes de production en 2019. Compte tenu du calendrier de production quotidienne, le nombre total de changements de séries pour les 7 lignes de production s'élevait à 175. Comme le temps de lancement dépend de la nature du couple « référence précédente/référence suivante » et même en considérant le plus petit temps de lancement qui est d'environ deux heures, la production a dû être arrêtée pendant au moins 350 heures (175*2). L'OCP a deux types de lignes de production (lignes 107 et 07 avec des taux de production de 108,3 tonnes/heure et 80,82 tonnes/heure, respectivement). En termes de capacité de production, sur les lignes 107, où l'arrêt de la production s'est élevé à 200 heures, la capacité de production perdue a atteint 21 660 tonnes (108,3*200) et sur les lignes 07, où la production a été arrêtée pendant au moins 150 heures, la capacité de production perdue était de 12 123 tonnes (80,82*150 tonnes). En outre, OCP connaît une gestion ardue des stocks dans ses 9 hangars de stockage, en raison, entre autres, de son système de production qui est basé sur le lancement irrégulier de petits lots.

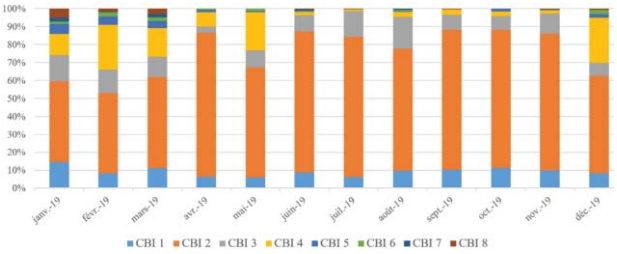


Figure 4: Part des CBC dans la production mensuelle globale de l'OCP

Par ailleurs, puisque nous examinons l'impact du RB sur le système productif de l'usine chimique, la préoccupation du producteur est le volume des CBC à produire dans son site de production et non la manière dont ceux-ci seront utilisés plus loin dans la chaîne logistique au niveau des unités de blending.

Cela dit, la figure 4 montre comment la production aurait été obtenue mois par mois si les CBC auraient été utilisées. Une comparaison des figures 3 et 4 montre comment cette transformation simplifie considérablement la gestion de la production puisque les 4 premiers CBC, en particulier le deuxième, représentent plus de 90 % de la production mensuelle.

La massification des flux présentée ci-dessus montre l'opportunité de concevoir un nouveau système de production basé sur une PPS. En utilisant sept lignes de production, dont trois ont un débit annuel d'environ 897 000 tonnes et quatre un débit annuel d'environ 669 000 tonnes, la gestion de la production de 8 CBC est relativement simple. En effet, compte tenu des parts respectives des CBC (cf. figure 2) et des débits de ces lignes de production, nous recommandons d'affecter les CBC à des lignes de production dédiées afin d'assurer une production continue dans toute la mesure du possible (un CBC par ligne de production) et de profiter ainsi d'une production rationalisée et économique. En effet, étant donné que CBC 2 représente plus de 66 % du volume de production annuel, on peut lui dédier trois lignes de production complètes. Pour les CBC 1, 3 et 4, représentant chacun environ 10 %, nous proposons de consacrer une ligne de production à chacun d'eux. Enfin, le reste des CBC représentant moins de 4 % de la production totale, nous recommandons de leur affecter une seule ligne de production.

En produisant en flux continu, les lignes mono-produits éliminerait les arrêts dus aux temps de lancement, augmentant ainsi la capacité de production. Quant à la seule ligne multi-produits restante, elle pourrait conser-

ver une logique de production au point de commande (la production démarre lorsqu'un niveau de stock donné est atteint) pour produire CBC 5 qui représente près de 2 % de la production annuelle. Concernant les CBC 6, 7 et 8 (représentant chacun moins de 1 % de la production annuelle), la production pourrait être déclenchée lorsque le stock descend en dessous du stock de sécurité et arrêtée lorsque la capacité de stockage est pleinement utilisée.

Le portefeuille de produits actuel de l'OCP couvre un ensemble limité d'engrais avec 5 références représentant plus de 60 % des ventes. Dans ce contexte, la contribution du RB paraît peu cruciale. Néanmoins, notre objectif n'est pas de remplacer la production des 28 engrais par celle des 8 CBC, mais plutôt de démontrer l'impact sur la production et le stockage d'une BC permettant de fabriquer à la demande des centaines de formules d'engrais. L'argument en faveur de notre solution devient très convaincant si OCP poursuit sa stratégie de conquête des marchés émergents en leur proposant des engrais personnalisés, car il devra alors augmenter considérablement la diversité de ses produits (à hauteur d'une centaine d'engrais) : dans ces conditions, la contribution de RB devient évidente.

5 CONCLUSION

À travers la différenciation retardée (un hybride PPS/PAC), le Reverse Blending ─ une technique qui peut être utilisée dans les industries opérant dans des contextes de mélange ─ offre les avantages à la fois d'une PPS (c'est-à-dire faciliter la gestion de la production, du stockage et de la distribution, augmenter la capacité de production et réduire les délais de livraison aux clients) et d'une PAC (c'est-à-dire offrir des produits personnalisés et conserver un avantage concurrentiel), tout en supprimant leurs principaux inconvénients respectifs : les coûts élevés de stockage et les longs délais de livraison.

Notre étude de cas montre que des économies importantes peuvent être réalisées au niveau du système de production, l'impact au niveau des stocks et des expéditions reste encore à étudier. Enfin, il convient de rappeler que cette approche peut nécessiter un redesign des processus de production et de distribution, car les industries qui cherchent à implémenter le RB pourraient devoir modifier leurs points de découplage. Ainsi, alors que plusieurs avantages potentiels du RB sont explorés dans cet article, la prochaine étape de cette recherche devrait consister à examiner les défis auxquels seraient confrontés les producteurs souhaitant mettre en œuvre le RB.

REFERENCES

Incrocci, L., D. Massa, and A. Pardossi, New trends in the fertigation management of irrigated vegetable crops. Horticulturae, 2017. 3(2): p. 37.

Salvador, F., C. Forza, and M. Rungtusanatham, Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: theorizing beyond generic prescriptions. Journal of operations management, 2002. 20(5): p. 549-575.

Da Cunha Reis, A., L.F. Scavarda, and B.M. Pancieri, Product variety management: A synthesis of existing research. African Journal of Business Management, 2013. 7(1): p. 39.

Johnson, M.D. and R.E. Kirchain, Quantifying the effects of product family decisions on material selection: A process-based costing approach. International Journal of Production Economics, 2009. 120(2): p. 653-668.

Boone, C.A., C.W. Craighead, and J.B. Hanna, Postponement: an evolving supply chain concept. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2007.

Van Hoek, R.I., The rediscovery of postponement a literature review and directions for research. Journal of operations management, 2001. 19(2): p. 161-184.

Kerkkänen, A., Determining semi-finished products to be stocked when changing the MTS-MTO policy: Case of a steel mill. International Journal of Production Economics, 2007. 108(1-2): p. 111-118.

Benhamou, L., Giard, V., Khouloud, M., Fenies, P., & Fontane, F. (2019). Reverse Blending : An economically efficient approach to the challenge of fertilizer mass customization. International Journal of Production Economics, 107603.

Karam, A.-A., Liviu, M., Cristina, V., & Radu, H. (2018). The contribution of lean manufacturing tools to changeover time decrease in the pharmaceutical industry. A SMED project. Procedia Manufacturing, 22, 886 892.

Chang, J. C., Graves, S. C., Kirchain, R. E., & Olivetti, E. A. (2019). Integrated planning for design and production in two-stage recycling operations. European Journal of Operational Research, 273(2), 535 547.

Sharda, B. and N. Akiya, Selecting make-to-stock and postponement policies for different products in a chemical plant: A case study using discrete event simulation. International Journal of Production Economics, 2012. 136(1): p. 161-171.

Gupta, D. and S. Benjaafar, Make-to-order, make-to-stock, or delay product differentiation? A common framework for modeling and analysis. IIE transactions, 2004. 36(6): p. 529-546.

Agra, A., M. Poss, and M. Santos, Optimizing make-to-stock policies through a robust lot-sizing model. International Journal of Production Economics, 2018. 200: p. 302-310.

Morikawa, K., K. Takahashi, and D. Hirotani, Make-to-stock policies for a multistage serial system under a make-to-order production environment. International Journal of Production Economics, 2014. 147: p. 30-37.

Soman, C.A., D.P. Van Donk, and G. Gaalman, Combined make-to-order and make-to-stock in a

food production system. International Journal of Production Economics, 2004. 90(2): p. 223-235.

Jewkes, E.M. and A.S. Alfa, A queueing model of delayed product differentiation. European Journal of Operational Research, 2009. 199(3): p. 734-743.

Fornasiero, R., L. Macchion, and A. Vinelli, Supply chain configuration towards customization: a comparison between small and large series production. IFAC-PapersOnLine, 2015. 48(3): p. 1428-1433.

Tyagi, S., Optimization of a platform configuration with generational changes. International Journal of Production Economics, 2015. 169: p. 299-309.

Gungor, Z.E. and S. Evans, Understanding the hidden cost and identifying the root causes of changeover impacts. Journal of Cleaner Production, 2017. 167: p. 1138-1147.

Ferradás, P.G. and K. Salonitis, Improving changeover time: a tailored SMED approach for welding cells. Procedia CIRP, 2013. 7: p. 598-603.

Meixell, M.J., The impact of setup costs, commonality, and capacity on schedule stability: An exploratory study. International Journal of Production Economics, 2005. 95(1): p. 95-107.

Grundemann, L., Gonschorowski, V., Fischer, N., & Scholl, S. (2012). Cleaning waste minimization for multiproduct plants : Transferring macro batch to micro conti manufacturing. Journal of Cleaner Production, 24, 92 101.

Karasu, M. K., Cakmakci, M., Cakiroglu, M. B., Ayva, E., & Demirel-Ortabas, N. (2014). Improvement of changeover times via Taguchi empowered SMED/case study on injection molding production. Measurement, 47, 741 748.

STRATEGIE INTEGREE DE PRODUCTION, MAINTENANCE ET DE CARTE DE CONTROLE D'UNE CHAINE LOGISTIQUE SOUS CONTRAINTE DE QUALITE

Aminu Sahabi Abubakar
LGIPM-UFR-MIM
University of Lorraine
Metz, France
aminu-sahabi.abubakar@univ-lorraine.fr

Aime Nyoungue
LGIPM-UFR-MIM
University of Lorraine
Metz, France
aime.nyoungue@univ-lorraine.fr

Hajej Zied
LGIPM-UFR-MIM
University of Lorraine
Metz, France
zied.hajej@univ-lorraine.fr

RESUME : *Dans ce papier, nous présentons une approche conjointe de la Production, de la Maintenance et de la Qualité pour le management d'une Chaine Logistique (d'approvisionnement). Le système de production considéré est soumis à une défaillance aléatoire qui affecte directement la qualité des produits. La dégradation du système est en fonction de la durée de son utilisation et sa variabilité de la production. Le contrôle du processus de production et de la qualité des produits est effectué à l'aide de son outil "carte de contrôle Moyenne-Écart type" du MSP (Maîtrise Statistique des Processus). Cet article présente en plusieurs entrepôts permettant de satisfaire des demandes aléatoires sur un horizon fini, avec un niveau de qualité exiger. L'objectif étant d'établir une stratégie optimale de planification de la production et de maintenance, en tenant compte de l'influence du taux de production sur la dégradation du système et en fonction de la moyenne des mesures de l'indicateur de qualité* $\bar{X}$ *par rapport aux limites de contrôle, ce qui minimise le coût total.*

MOTS-CLES : *Demande aléatoire, Carte de contrôle, Multi-entrepôts, Qualité de la production, Taux de défaillance*

1 INTRODUCTION

L'évolution des conditions économiques du marché mondial, les produits de haute qualité à des prix compétitifs, avec des délais de livraison réduits, sont devenu une exigence clients en termes de conscience et de demande. La qualité d'un produit, ou d'un service, n'est réduite que lorsqu'elle affecte soit le processus qui le crée en augmentant les coûts, le temps ou les contraintes, soit le produit ou le service final utilisé par un client. Cela implique que la qualité ne se limite pas à la perfection d'un produit ou d'un service, mais qu'une qualité élevée permet d'atteindre la perfection dans les performances d'un produit ou d'un service, ou bien de s'en rapprocher le plus possible. Pour garantir la conformité de la qualité ainsi que la satisfaction du client, plusieurs méthodes d'amélioration continue peuvent être appliquées dans chaque phase du processus de production, telles que le Six Sigma, l'analyse des systèmes de mesure, l'analyse des causes et des conséquences.

Dans cette étude, nous nous concentrons sur la méthode Six sigma qui est utilisée dans les entreprises de production ou les industries de services. Cette méthode utilise les outils de base pour améliorer la qualité des produits et des processus en réduisant leur variabilité et le taux de défauts qui y est associé, tels que la carte de contrôle qui est basée sur l'approche de la Maîtrise Statistique des Processus (MSP).

Dans ce contexte, le Six Sigma se concentre en l'application de la méthodologie DMAIC (Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer, Contrôler) pour obtenir une amélioration durable [Starbird D., 2002.]. D'autre part, les plans de maintenance et de production optimaux qui minimisent le coût total incluant la production, l'inventaire et la maintenance sont l'une des premières actions d'un processus de décision hiérarchique. La défaillance ou le dysfonctionnement du système de production est considéré comme l'une des causes de la production d'articles non-conformes. Par conséquent, l'intégration du contrôle statistique des processus, de la maintenance et de la production est considérée comme la solution pour réduire les défauts de production. L'intégration de la carte de contrôle "Moyenne-Écart type" et de la stratégie de maintenance préventive périodique est traitée dans plusieurs travaux recherches afin de stabiliser le processus et éviter la production de non-conformité ([Ben-Daya M. *et al.*, 2000], [Pandey D. *et al.*, 2011], [Lesage A. *et al.*, 2015], [Salmasnia A. *et al.*, 2017]).

L'entreprise doit définir un plan de production optimal et une stratégie de maintenance pour fabriquer les produits qui satisfont une demande aléatoire dans des périodes futures. Dans ce contexte, [Buzacott J.A., 1967] a analysé le problème de la maintenance intégrée aux stratégies de production en étudiant le rôle des stocks tampons dans l'augmentation de la productivité du système. Plus récemment, [Turki S. *et al.*, 2012] a déterminé simultanément les plans optimaux de production et de maintenance ainsi que le plan de livraison optimal en tenant compte du délai de livraison, des pannes de machines, de la demande aléatoire et du droit de rétractation. En effet, le délai de livraison et la quantité transportée sont des caractéristiques importantes des systèmes de fabrication. Ainsi, les entreprises s'efforcent de réduire les délais de transport et de livraison, qui sont la période de temps que prend la production entre un magasin de fabrication et un magasin

d'achat (client), et qui a généralement un grand impact sur les mesures de leurs performances. Ainsi, dans [Lee H. 2011] l'auteur développe un modèle pour soutenir les stratégies d'investissement concernant les stocks et la maintenance préventive dans un système de production imparfait qui tient compte du délai de livraison au client.
Dans cet article, nous traitons d'un système de production composé de plusieurs entrepôts permettant de satisfaire des demandes aléatoires avec une contrainte de qualité. L'originalité de ce travail est qu'il permet de déterminer les plans optimaux de production, de maintenance et de livraison de la production basé sur le résultat de la carte de contrôle et de la corrélation entre la production et la maintenance. En effet, afin de respecter le niveau de service, chaque entrepôt doit contenir suffisamment de pièces pour satisfaire les demandes des clients.

2 PROBLÈME DE PRODUCTION ET DE MAINTENANCE

2.1 Notations

Les paramètres suivants sont utilisés dans le calcul la formulation du modèle :
τ_i : délai de livraison pour l'entrepôt S_i
L : numéro de l'entrepôt
Δt : durée d'une période de production
H : nombre de périodes de production dans l'horizon de planification
$H.\Delta t$: longueur de l'horizon de planification finie
$u(k)$: taux de production de la machine M pendant la période k (k=0, 1,..., H-1)
$U=\{u(0), u(1), ..., u(H-1)\}$
$Q_i(k)$: taux de livraison pendant la période k (k=0, 1, ..., H-1) pour chaque entrepôt
$Q_i=\{Q_i(0), Q_i(1), ..., Q_i(H-1)\}$
$\hat{d}_i(k)$: demande moyenne pendant la période k (k=0, 1, ..., H) pour chaque client
$V_{di(k)}$: variance de la demande pendant la période k (k=0, 1, ..., H) pour chaque client
$S(k)$: niveau d'inventaire de S à la fin de la période k (k=0, 1, ..., H)
$w_i(k)$: niveau d'inventaire de Si (i : 0...L) à la fin de la période k (k=0, 1, ..., H) pour chaque entrepôt
C_p : coût de production unitaire de la machine M
C_h : coût de détention en stock d'une unité de produit pendant une période au premier magasin S.
C_{hi} : coût de détention d'une unité de produit pendant une période dans l'entrepôt Si (i : 0...L)
C_M : coût total de la maintenance
C_{pm} : coût des actions de maintenance préventive
C_{cm} : coût des actions de maintenance corrective
Mu : unité monétaire
U_{max} : taux de production maximal de la machine M
U_{min} : taux de production minimal de la machine M
θ_i : indice de probabilité lié à la satisfaction de chaque client i et exprimant le niveau de service.
J : nombre moyen d'échantillons pour détecter l'état "hors contrôle".
δ_i : L'ampleur du passage à l'état "incontrôlable" par rapport à la ligne centrale
A : Nombre d'écarts types entre la ligne centrale de la carte de contrôle et les limites de contrôle
C_i : Coût unitaire de l'inspection
C_r : Coût unitaire d'une unité défectueuse

2.2 Description du problème

Dans cette étude, une optimisation conjointe de la production, de la maintenance et de la planification du problème de contrôle de la qualité est présentée. Nous considérons une chaîne Logistique (d'approvisionnement) composée d'un système de production avec une seule machine qui produit un type de produit, un magasin principal de fabrication S et un entrepôt multi-achats (w_0, w_1, ... w_L) (où le client reçoit sa demande (produits)). Chaque entrepôt vise à satisfaire une demande aléatoire multiple sous un niveau de qualité spécifique donnée sur un horizon fini H de production. τ_i : (i=0, ..., L) (voir Figure1).

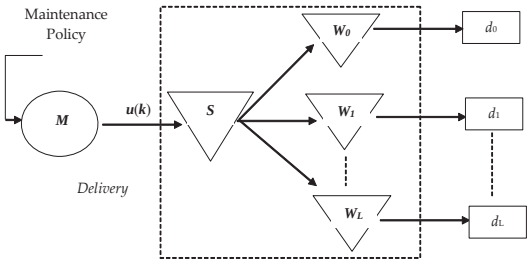


Figure 1 : Exemple de chaine logistique

La machine M est soumise à une défaillance aléatoire. Le degré de dégradation de la machine est influencé par les taux de production, par conséquent, le taux de défaillance $\lambda(t)$ augmente avec le temps et le taux de production $u(k)$; et affecte la fiabilité du processus de production, générant ainsi des produits non conformes. Nous avons supposé que la machine soit contrôlée à chaque unité de temps h pendant la période de production Δt par une statistique quantitative de qualité X avec des mesures n_t pour l'échantillon t. On suppose que les mesures individuelles doivent toutes être comprises entre la limite supérieure de spécification LSS et la limite inférieure de spécification LIS. Les résultats des mesures sont enregistrés dans une fiche de mesure avec un risque de la première espèce. Le processus de production est supposé stable si la loi de X_t est une gaussienne centrée réduite avec paramètres : une moyenne $\mu_0 = 0$ et un écart-type connus ou bien estimés σ_0. Le processus est sous contrôle lorsque toutes les statistiques sont comprises entre les limites de contrôle : limite inférieure de contrôle LIC et limite supérieure de contrôle LSC. Afin de réduire la dégradation ainsi que le taux de défaillance, qui lui dépend de la variation du taux de production de la machine, une stratégie de maintenance (PMMR : actions de maintenance préventive parfaite avec

une réparation minimale) est effectuée pendant l'horizon fini de la production.

Pendant un horizon, des actions de maintenance préventive parfaite d'une durée négligeable sont périodiquement planifiées T=α.Δt=α.β.h (α et β sont des nombres entiers) ; et lorsque le processus de production est "sous contrôle", des actions de réparation minimale pour chaque panne sont entreprise entre deux maintenances préventives successives (scénario 1).

D'autre part, en raison par exemple de l'apparition d'une cause assignable, la moyenne des mesures de l'indicateur de qualité entre le j^{ème} et le (j+1)^{ème} échantillonnage se situe en dehors des limites fixées par LIC et LSC, le processus de production est dit "hors de contrôle" (scénario 2) :

$LIC \le \overline{X_t} \le LSC$ avec $LIC = \mu_0 - \frac{A}{\sqrt{n}} \times \sigma_0$ et $LSC = \mu_0 + \frac{A}{\sqrt{n}} \times \sigma_0$ ou la valeur moyenne de la caractéristique de qualité change de μ_0 à $\mu_0 + \delta_i \cdot \sigma_0$. Par conséquent, la production est suspendue par une action de maintenance corrective qui permet de remettre la machine dans un état comme neuf (As Good As New) et la planification classique de la maintenance préventive en fonction du taux de défaillance cumulé est reprise à partir de cette période (Figure 2).

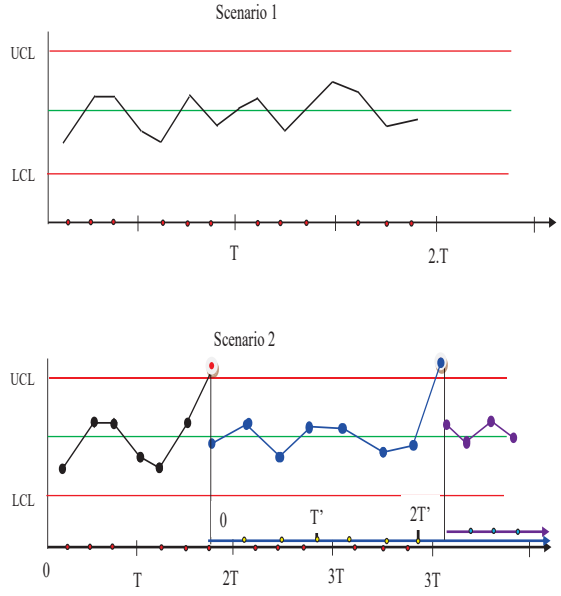


Figure 2. Stratégie intégrée du contrôle qualité et de maintenance

3 FORMULATION DU PROBLÈME

L'objectif de cette étude est de déterminer dans un premier temps le plan de production optimal afin de satisfaire la demande aléatoire du client sous un niveau de service et de qualité donné. Ensuite, en fonction du plan de production économique, des paramètres optimaux de la carte de contrôle qui sont : la taille de l'échantillon *n*, l'intervalle de contrôle *h* et le coefficient A des limites de contrôle ainsi que la stratégie de maintenance optimale caractérisée par le nombre optimal d'actions de maintenance préventive *N*. L'objectif est de minimiser les coûts escomptés liés à la production, au stock, à la maintenance et à la qualité, y compris les coûts d'échantillonnage et de rejet pendant l'horizon de temps fini. On suppose que l'horizon est divisé en H périodes de longueur égale à *Δt*. De plus, nous faisons l'hypothèse que la fluctuation des demandes est un processus normal avec une moyenne et une variance donnée respectivement par $\hat{d}_i$ et V_{d_i} que les demandes sont satisfaites à la fin de chaque période. L'efficacité d'une carte de contrôle peut être mesurée en utilisant la probabilité de ne pas détecter un ajustement lors du prélèvement d'un échantillon de taille n. L'efficacité de la carte est d'autant plus grande que cette probabilité est faible. Lorsque le processus ne fonctionne pas correctement, la moyenne peut varier et prendre comme valeur μ. Nous notons *c* l'expression de l'ajustement de la moyenne en fonction d'écarts types :

$$c = \frac{\mu - \mu_0}{\sigma_0} \quad (1)$$

Soit $P_j(c)$ la probabilité de ne pas détecter un ajustement de c écarts-types lors du prélèvement d'un échantillon de n pièces.

$$P_j(c) = F\left(-c \cdot \sqrt{n} + A\right) - F\left(-c \cdot \sqrt{n} - A\right) \quad j=\{1, 2, \ldots\} \quad (2)$$

Avec *F* : la fonction de distribution de la loi normale centrée réduite.

Ainsi, la période opérationnelle moyenne (AOP) caractérise le nombre moyen d'échantillons successifs conduisant au premier point hors tolérance, pour un ajustement donné.

$$AOP_j = \frac{1}{1 - P_j(c)} = \frac{1}{1 - F\left(-c \cdot \sqrt{n} + A\right) + F\left(-c \cdot \sqrt{n} - A\right)} \quad (3)$$

- Coût de détention

Le coût total de détention HC comprend le coût de stockage de chaque produit. Le coût détention pour le stock principal est donné par l'expression suivante :

$$HC_S = \sum_{k=1}^{H} C_h \times Z_S(k) \quad (4)$$

$Z_S(k)$ est la surface générée par l'évolution du niveau de stockage au cours de la période *k* (*k*=1,……,H)

L'évolution du niveau de stockage est caractérisée par le niveau de l'équation du bilan des détentions dans le magasin principal *S* est formulé de manière suivante :

$$S(k) = S(k-1) + u(k) \cdot \Delta t - \sum_{i=1}^{L} Q_i(k) \quad (5)$$

(k=1,..., H), et Où S(0)=0. So,

$$S(k)=\sum_{i=1}^{k-1}\left(u(i)\cdot\Delta t-\sum_{j=1}^{L}Q_j(k)\right) \quad (6)$$

La surface générée au cours d'une période est donnée comme suit :

$$Z_S(k)=\max\left(S(k-1),0\right)\cdot\Delta t+\tfrac{1}{2}\cdot u(k)\cdot\Delta t^2 \quad (7)$$

(k=1,..., H)

Le coût de détention des stocks pour l'ensemble des entrepôts est donné par l'expression suivante :

$$HC_W=\sum_{k=1}^{H}C_h\times Z_w(k) \quad (8)$$

$Z_w(k)$ est la surface générée par l'évolution du niveau de stockage au cours de la période *k* (*k*=1, …,H)

Le niveau d'inventaire de chaque entrepôt w_i à la période k est donné par l'équation suivante :

$$w_i(k)=w_i(k-1)+Q_i(k-\tau_i)-d_i(k) \quad (9)$$

(*k*=0, *1 ,..., H-1)* et (*i=1 ,..., L)*

Le niveau de stock de chaque entrepôt w_i à la période *k* est égal au niveau de stock de w_i à la période *k*-1 plus la quantité de produits qui arrive à w_i (c'est-à-dire $Q_i(k-\tau)$) moins la demande du client d_i à la période *k*.

Pour chaque entrepôt, la surface générée de l'évolution du niveau des stocks au cours d'une période est donnée comme suit :

$$Z_{w,i}(k)=\max\left(w_i(k-1),0\right)\cdot\Delta t+\tfrac{1}{2}\cdot Q_i(k-\tau_i)\cdot\Delta t^2 \quad (10)$$

Par conséquent, le coût d'exploitation est exprimé comme suit :

$$HC=C_h\times\sum_{k=1}^{H}\begin{pmatrix}\max\left(S(k-1),0\right)\cdot\Delta t+\tfrac{1}{2}\cdot u(k)\cdot\Delta t^2\\+\max\left(w_i(k-1),0\right)\cdot\Delta t+\tfrac{1}{2}\cdot Q_i(k-\tau_i)\cdot\Delta t^2\end{pmatrix} \quad (11)$$

Les exigences de niveau de service pour chaque entrepôt à chaque période k est exprimée par la contrainte suivante.

$$\text{Prob}\left[w_i(k)\geq 0\right]\geq\theta_i \quad (12)$$

(k= 1,..., H-1) and *(i=1,..., L)*

La contrainte suivante définit une limite supérieure et inférieure du niveau de production au cours de chaque période k.

$$U_{\min}\leq u(k)\leq U_{\max} \quad (13)$$

- Coût de Production

Le coût de production pour la période k est :

$$PC=C_p\times\sum_{k=1}^{H}u(k)\cdot\Delta t \quad (14)$$

- Pénalités de retard

Les pénalités de retard se justifies par les conséquences que peuvent causer un retard dans la satisfaction de toutes demandes. Si une situation de retard s'est produite à la fin de la période *k*, elle a provoqué une pénurie qui s'établie au cours de la période suivante (*k*+1) :

Les pénalités sont déterminées en fonction de la durée requise *dw*(.) pour produire la quantité manquante à la fin de chaque période, donnée par l'expression suivante :

$$PC=C_p\times\left(\sum_{k=1}^{H}\left(\sum_{i=1}^{L}dw_i\right)\right) \quad (15)$$

$$dw_i=\frac{\left|\min(w_i(k),0)\right|}{Q(k+1-\tau_i)}$$

- Politique de Maintenance

Le coût de la maintenance est constitué des coûts de maintenance préventive et corrective et dépend également du scénario qui se produit : "scénario 1 : en contrôle" ou "scénario 2 : hors contrôle".

La résolution du problème de planification de la maintenance consiste à minimiser les coûts liés à la maintenance préventive et corrective. La stratégie de maintenance envisagée dans ce travail est une maintenance périodique préventive avec une réparation minimum lorsque le système est dans un état "sous contrôle". Les actions préventives doivent être planifiées sur l'horizon fini *H* qui se divise en *N* parties égales de durée *T*. Nous supposons que l'exécution d'une action préventive correspond aux temps *i.T* (i=1, 2, ..., *N*) consiste à remettre la machine dans un état neuf (AS GOOD AS NEW). Cependant, entre les interventions préventives successives, des pannes peuvent survenir, une réparation minimale est effectuée. On suppose que les durées de réparation et de révision sont négligeables. Il est donc nécessaire de considérer et de garder à l'esprit que l'état des machines dépend de leur utilisation et de la variation du plan de transport.

La stratégie de maintenance est caractérisée par le nombre optimal *N** d'actions de maintenance préventive et le temps le plus adéquat entre lesdites actions noté T*.

$$C_M=P(S_1)\times C_{M1}+P(S_2)\times C_{M2} \quad (16)$$

$$P(S_1)=\text{Prob}\left(LSL\leq\overline{X}\leq USL\right)=F\left(\mu_0+A\times\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}\right)-F\left(\mu_0-A\times\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}\right)$$

$$P(S_2)=\text{Prob}\left(\overline{X}\leq LSL\right)+\text{Prob}\left(USL\leq\overline{X}\right)=F\left(\mu_0-A\times\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}\right)+1-F\left(\mu_0+A\times\frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}\right)$$

$$C_{M1}=C_{pm}\times\frac{H}{T}+C_{cm}\times\varphi_M(U,N) \quad (17)$$

Où $\varphi(U,N)$ est le nombre moyen de pannes en fonction du plan de production défini par le vecteur U et le nombre d'actions de maintenance préventive N.

$$\varphi_M(U,T)=\sum_{j=0}^{N-1}\left[\begin{array}{l}\displaystyle\sum_{i=In(j\times\frac{T}{\Delta t})+1}^{In\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)}\int_0^{\Delta t}\lambda_i(t)dt+\int_0^{(j+1)\times T-In\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)\times\Delta t}\lambda_{In\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1}(t)\\+\displaystyle\int_{(j+1)\times T}^{\left(In\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1\right)\times\Delta t}\frac{\left(\left(In\left((j+1)\times\frac{T}{\Delta t}\right)+1\right)\right)}{U_{\max}}\times\lambda_n(t)dt\end{array}\right]$$

(18)

Avec λ(t) représentant la fonction de taux de défaillance linéaire à la période de production k et exprimée comme suit :

$$\lambda_k(t) = \lambda_{k-1}(\Delta t) + \frac{u(k)}{U_{\max}} \cdot \lambda_n(t) \quad \forall t \in [0, \Delta t] \tag{19}$$

$\lambda_n(t)$ est le taux de défaillance lors des conditions nominales et correspond au taux de défaillance lorsque la machine fonctionne avec une production maximale pendant tout l'horizon H.Δt.

$$C_{M2} = \sum_{j=0}^{M} \left(C_{pm} \times \frac{AOP_{j+1} - AOP_j}{T_j} + C_{cm} \times \varphi_{Mj}(U, N_j) \right) + C_{pm} \times \frac{H - AOP_M}{T_M} + C_{cm} \times \varphi_M(U, N_M) \tag{20}$$

$AOP_0 = 0$

M représente le nombre de détection des états "hors contrôle" du système.

Avec $\varphi_{Mj}(U, N_j) = \sum_{z=0}^{Nj} \sum_{i=In(z\times\frac{T_j}{\Delta t})+1}^{In\left((z+1)\times\frac{T_j}{\Delta t}\right)\Delta t} \int_0 \lambda_i(t)dt$

$Nj = \left\lfloor \frac{AOP_{j+1} - AOP_j}{T_j} \right\rfloor$

et

$$\varphi_M(U, N_M) = \sum_{z=0}^{N_M} \sum_{i=In(z\times\frac{T_M}{\Delta t})+1}^{In\left((z+1)\times\frac{T_M}{\Delta t}\right)\Delta t} \int_0 \lambda_i(t)dt, \quad Nj = \left\lfloor \frac{H - AOP_M}{T_M} \right\rfloor$$

- Le coût total moyen de la qualité

Le coût total moyen de la qualité correspond à la somme du coût de l'échantillonnage et du coût du rejet des articles non conformes.

Le coût total moyen de l'échantillonnage est exprimé par :

$$SC = \sum_{j=0}^{M} C_i \times n \times \left(AOP_{j+1} - AOP_j \right) \tag{21}$$

Le coût moyen des articles non-conformes (NC) est exprimé par :

$$CNC = \sum_{j=0}^{M} C_r \times u\left(\left\lfloor \frac{AOP_j}{\Delta t} \right\rfloor \right) \tag{22}$$

Par conséquent, le coût moyen de la qualité est donné par

$$ACQ = \sum_{j=0}^{M} C_i \times n \times \left(AOP_{j+1} - AOP_j \right) + C_r \times u\left(\left\lfloor \frac{AOP_j}{\Delta t} \right\rfloor \right) \tag{23}$$

4 EXEMPLE NUMERIQUE

Une chaîne Logistique composée d'un système produisant un seul type de produits pour répondre à la livraison de deux entrepôts (L=2) qui satisferont des demandes aléatoires sous un horizon fini de planification : H=12 mois avec des périodes de durée Δt=1 mois. Nous supposons que l'écart type de chaque demande de produit est le même pour toutes les périodes et pour chaque demande $\sigma_{di(\{i:1,2\})}=1.2$ et faisons l'hypothèse que le niveau de stock initial est $S(0)=0$.

- Limites inférieure et supérieure des capacités de production sont : $U_{\min}=0$ et $U_{\max}=500$

C_p =2 mu, C_h=0.2 mu/k, Cs_i=0.2 mu/k {i : 1, …, L=2},

$S_i(0) = 0$ *with* $\{i:1,2\}$

- $\mu_0 = 5$; $\sigma_0 = 1{,}5$; $\delta = 0.8$
- Ci = 15$/ produit, Cr = 70$/ poste défectueuse
- le degré de satisfaction des clients, associé à chaque contrainte de stock en entrepôt, est égal à 90% (θ_i=0.9 (i=1, 2)).
- Les lois de dégradation du système de production est caractérisé par une distribution de Weibull avec des paramètres d'échelle et de forme sont respectivement $\beta_1=100$ et $\alpha_1=2$.
- Les coûts des actions de maintenance corrective et préventive sont respectivement Ccm=3000 mu Cpm=500 mu (unité monétaire).

$d_1(0)$	$d_1(1)$	$d_1(2)$	$d_1(3)$	$d_1(4)$	$d_1(5)$
150	170	150	150	150	140
$d_1(6)$	$d_1(7)$	$d_1(8)$	$d_1(9)$	$d_1(10)$	$d_1(11)$
160	140	160	150	150	150

Tableau 1 : Demandes moyennes pour le client de l'entrepôt 1

$d_2(0)$	$d_2(1)$	$d_2(2)$	$d_2(3)$	$d_2(4)$	$d_2(5)$
160	130	150	150	140	160
$d_2(6)$	$d_2(7)$	$d_2(8)$	$d_2(9)$	$d_2(10)$	$d_2(11)$
160	160	140	150	150	140

Tableau 2 : Demandes moyennes pour le client de l'entrepôt 2

Le plan optimal de production et de livraison pour chacun des entrepôts 1 et 2 est donné ci-dessous.

$u^*(1)$	$u^*(2)$	$u^*(3)$	$u^*(4)$	$u^*(5)$	$u^*(6)$
440	290	1250	320	320	420
$u^*(7)$	$u^*(8)$	$u^*(9)$	$u^*(10)$	$u^*(11)$	$u^*(12)$
410	420	360	230	1540	440

Tableau 3 : Plan optimal de production

$u^*(1)$	$u^*(2)$	$u^*(3)$	$u^*(4)$	$u^*(5)$	$u^*(6)$
440	290	1250	320	320	420
$u^*(7)$	$u^*(8)$	$u^*(9)$	$u^*(10)$	$u^*(11)$	$u^*(12)$
410	420	360	230	1540	440

Tableau 4 : Demandes moyennes pour le client

$Q_1^*(1)$	$Q_1^*(2)$	$Q_1^*(3)$	$Q_1^*(4)$	$Q_1^*(5)$	$Q_1^*(6)$
440	290	1250	320	320	420
$Q_1^*(7)$	$Q_1^*(8)$	$Q_1^*(9)$	$Q_1^*(10)$	$Q_1^*(11)$	$Q_1^*(12)$
410	420	360	230	1540	440

Tableau 4 : Plan de livraison pour l'entrepôt 1 (τ^*_1=3)

$Q_2^*(1)$	$Q_2^*(2)$	$Q_2^*(3)$	$Q_2^*(4)$	$Q_2^*(5)$	$Q_2^*(6)$
440	290	1250	320	320	420
$Q_2^*(7)$	$Q_2^*(8)$	$Q_2^*(9)$	$Q_2^*(10)$	$Q_2^*(11)$	$Q_2^*(12)$
410	420	360	230	1540	440

Tableau 5 : Plan de livraison pour l'entrepôt 1 (τ^*_1=3)

Ainsi, la meilleure stratégie obtenue consiste à prélever des échantillons de taille 60 (n*) tous les 5 jours (h*). En outre, selon la carte de contrôle, le nombre optimal d'écarts types entre la ligne centrale (moyenne) et les limites de contrôle est de 3,5 *(k**). Avant le premier passage à l'état "hors contrôle" qui se produit en moyenne après AOP_1=6.Δt=36 échantillons, deux actions de maintenance préventive (MP) périodique sont effectuées tous les T=3.Δt=18.*h* et 2T=6.Δt=36. *h.* Après ce premier état "hors contrôle" et jusqu'à la fin de l'horizon H.Δt, une moyenne de 2 actions de maintenance préventive (MP) serait effectuée.

5 CONCLUSION

Cet article traite d'une approche conjointe de la production, de la maintenance, de la livraison et du problème du contrôle qualité. Une combinaison optimale entre la dégradation de la machine, qui dépend des taux de production, et les paramètres de la carte de contrôle est développée, afin de réduire les produits non-conformes ainsi que de garantir la fiabilité du système de production. Sur la base d'un politique de production et d'une stratégie de maintenance proposées (PMMR), un modèle mathématique qui minimise le coût total de production, de maintenance, d'inventaire, de la qualité est développé. Ce modèle mathématique permet obtenir les différentes variables de décision caractérisées par : la taille des échantillons, l'intervalle d'échantillonnage, les coefficients des limites de contrôle, la période de Maintenance Préventive.
En perspective, on peut considérer un système de multi-produits et son impact sur la vitesse de dégradation ainsi que le taux de défaillance des machines, et proposer une nouvelle stratégie de maintenance en fonction de la qualité du produit et sous la contrainte de l'exigence des clients.

REFERENCES

Starbird D., 2002. Business Excellence: Six Sigma as a ManagementSystem. *ASQ's 56th Annual Quality Congress Proceedings*. p. 47–55.

Ben-Daya M. and Rahim M. A., 2000. Effect of maintenance on the economic design of x-control chart. *European Journal of Operational Research,* 120(1), p. 131-143.

Pandey D., Kulkarni, M. S., and Vrat, P., 2011. A methodology for joint optimization for maintenance planning, process quality and production scheduling. *Computers & Industrial Engineering,* 61(4), p. 1098-1106.

Lesage A., and Dehombreux P., 2015. Simulation of Manufacturing Processes Subject to Maintenance and Quality Control: Sensitivity Analysis and Numerical Example. *International Journal of Mechanical Engineering and Automation,* 3, p. 119-126.

Salmasnia A., Abdzadeh B. and Namdar M., 2017. A joint design of production run length, maintenance policy and control chart with multiple assignable causes. *Journal of Manufacturing Systems,* 42, p. 44-56.

Buzacott J.A., 1967. Automatic transfer lines with buffer stocks. *International Journal of Production Research,* 5 (3), p.183.

Turki S., Hajej Z. and Rezg N., 2012. Impact of delivery time on Optimal Production/Delivery/Maintenance Planning. *8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering,* p. 335 – 340.

Lee H., 2011. A cost/benefit model for investments in inventory and preventive maintenance in an imperfect production system. *Computers & Industrial Engineering,* 48, p. 55-68

13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation - MOSIM'20 - 12 au 14 novembre 2020
Agadir - Maroc "Nouvelles avancées et défis pour des industries durables et avisées"

DÉPLOIEMENT DES VÉHICULES DE SECOURS ET D'ASSISTANCE AUX VICTIMES EN TENANT COMPTE DE L'OPTIMISME DU DÉCIDEUR

Oussama BEN-AMMAR[1], Romain GUILLAUME[2], Caroline THIERRY[2]
[1] Mines Saint-Étienne, Univ Clermont Auvergne, UMR-CNRS 6158 LIMOS
CMP Department of Manufacturing Sciences and Logistics
880 route de Mimet, F-13541 Gardanne, France
oussama.ben-ammar@emse.fr
[2] Universitée de Toulouse-IRIT 5 Alléees A. Machado 31058 Toulouse Cedex 1, France
romain.guillaume@irit.fr, thierry@univ-tlse2.fr

RÉSUMÉ : *Le problème d'affectation de véhicules de secours (VS) aux centres de secours (CS) de différentes villes est traité en vue d'améliorer la réponse opérationnelle d'un service départemental d'incendie et de secours (SDIS). Cette affectation se fait dans un contexte incertain car l'occurrence des accidents n'est pas connu précisément. Nous étudions donc un problème de redéploiement à moyen terme de VD à des CS avec une incertitude sur l'occurrence des accidents. Un modèle mathématique basé sur une approche de programmation à deux niveaux de décision est développé afin de proposer un plan de redéploiement qui minimise le temps nécessaire pour atteindre le lieu d'un accident. Pour permettre au décideur (DM) de mieux gérer les risques de sa décision, nous proposons un modèle basé sur le critère de Hurwicz, qui permet de prendre en compte conjointement la meilleure et la pire séquence d'occurrence des accidents. Le DM a ainsi à sa disposition un ensemble de solutions plus ou moins pessimistes quant à la séquence d'apparition des accidents. Nous illustrons notre méthode sur un exemple.*

MOTS-CLÉS : *Service médical d'urgence, déploiement des capacités, incertitude, critère de Hurwicz.*

1 INTRODUCTION

Les services d'urgence tels que les services d'incendie effectuent des interventions en utilisant des véhicules stationnés dans des emplacements déterminés. En France, dans chaque département il existe un service public appelé le SDIS. Il est composé d'une unité de lutte contre l'incendie (composée de professionnels et de volontaires, de personnels techniques et administratifs). Ses fonctions principales sont les opérations de secours, de préparation et de prévention. Le SDIS vise à prévenir tous les risques pour la sécurité civile, comme les accidents, les catastrophes et les risques naturels ; il prépare des mesures de sauvegarde et d'organisation des moyens de secours, organise souvent des campagnes de prévention et d'évaluation des risques de sécurité civile, lutte contre tout type d'incendie et propose également des aides d'urgence. Dans cet article, nous nous intéressons particulièrement au service médical d'urgence du SDIS.

Le SDIS est composé de centres de secours (CS) qui couvrent le département. Le département est divisé en secteurs qui sont couverts des CS avec une liste de priorités appelée «plan de déploiement» (DP). Le premier CS de chaque DP, appelé "premier centre d'appel", est normalement appelé pour couvrir le secteur. Le deuxième sur le DP, appelé "deuxième centre d'appel", est appelé lorsque le premier centre d'appel n'a pas assez de VS disponibles pour secourir l'accident et ainsi de suite jusqu'au dernier CS. Les DP sont construits automatiquement en fonction du temps nécessaire pour atteindre un secteur à partir d'un CS donné : le premier centre du DP est celui qui est le plus proche puis le deuxième centre qui est le deuxième le plus proche et ainsi de suite.

En cas de secours d'urgence aux personnes victimes d'accidents, l'objectif du SDIS est, pour 80 % des interventions, d'avoir un ensemble de CS pouvant intervenir entre 10 à 20 minutes (selon des zones prédéfinies). Dans ce contexte, nous cherchons à définir la capacité de chaque CS, autrement dit, le déploiement des véhicules de secours (VS) dans les CS en considérant que les séquences d'apparition des accidents sont incertaines. Pour déterminer ces capacités, le SDIS ne dispose que des données concernant les besoins simultanés en VS dans chaque CS qui dépendent du nombre d'accidents survenus simultanément dans les secteurs du même DP. Cette simultanéité est due à l'occurrence d'un ou plusieurs accidents nécessitant un ou plusieurs VS à un moment donné.

Dans le cas où seules les données concernant les besoins simultanés en VS sont disponibles, la prise en

compte de l'incertitude est obligatoire. Afin d'étudier cette incertitude, nous prenons en compte l'optimisme du décideur en utilisant le critère de Hurwicz qui considère à la fois la meilleure et la pire des séquences d'occurrence des accidents. Nous allons ainsi proposer une aide à la décision pour évaluer les performances du SDIS et diminuer les temps de réponse pour des besoins simultanés en VS.

Dans la littérature, plusieurs modèles ont été développés pour étudier les problèmes de planification des services d'aide médicale urgente (SAMU) pour optimiser l'emplacement de nouveaux établissements. Les lecteurs intéressés peuvent se référer à Bélanger et al. (2019), Li et al. (2019), Aboueljinane et al. (2013) et Hulshof et al. (2012).

Cependant, les objectifs principaux de la plupart de ces études ont été la minimisation du temps d'intervention, l'amélioration des soins et la réduction de la mortalité. Toregas et al. (1971), ReVelle and Swain (1970) et Carbone (1974) ont été parmi les premiers à étudier le Location Set Covering Problem (LSCP). L'objectif principal était de minimiser le nombre d'installations (centres) pour couvrir l'ensemble des points de demande. Après cela, le Maximal Covering Location Problem (MCLP) a été introduit par Church and ReVelle (1974) pour déterminer le nombre de ressources nécessaires pour maximiser le nombre de points de demande couverts par un nombre fixe et limité de ressources. Dans Akbari et al. (2018), les auteurs ont précisé que dans ces modèles, tous les établissements sont indépendants et considérés comme des centres de secours (c'est-à-dire qu'un établissement est un CS). Ils ont une capacité infinie, ou sont considérés comme une seule ressource (c'est-à-dire qu'une installation est un véhicule), et sont toujours considérés comme disponibles.

Dans ce travail préliminaire, nous ne fournissons pas une revue exhaustive de la littérature mais seulement un aperçu rapide des problèmes étudiés qui sont proches du notre. Pour tenir compte de la disponibilité des ressources, des modèles probabilistes ont été proposés pour déterminer le meilleur emplacement qui maximise, avec une probabilité donnée, la population couverte pouvant être satisfaite par une installation disponible. Ces modèles sont dérivés de plusieurs problèmes connus :

- le MCLP avec optimisation d'un ensemble de scénarios (Chow and Regan, 2011; Haight and Fried, 2007; Serra and Marianov, 1998; MacLellan and Martell, 1996), ou avec des incertitudes sur l'emplacement (Zhang et al., 2017), ou pour trouver un sous-ensemble d'installations qui maximise la couverture des demandes client tout en respectant une contrainte budgétaire sur le coût des installations (Cordeau et al., 2019).
- le Maximum Expected Covering Location Problem (MEXCLP) introduit par Daskin (1983) et largement étudié depuis (Bagherinejad and Shoeib, 2018; Vatsa and Jayaswal, 2016; Grannan et al., 2015; Dell'Olmo et al., 2014).
- le Maximum Availability Location Problem (MALP) proposé par ReVelle and Hogan (1989) et largement étudié depuis (Acuna et al., 2020; Boutilier and Chan, 2020; Abdul Ghani and Ahmad, 2017)

Ces modèles ont également été combinés avec des modèles de simulation afin d'évaluer et comparer les solutions optimales et approchées (McCormack and Coates, 2015). Il existe aussi des modèles basés sur la programmation stochastique avec des contraintes probabilistes qui visent à déterminer à la fois l'emplacement des installations (qui sont des sites de services de secours) et l'allocation de véhicules de secours à chaque site (Naoum-Sawaya and Elhedhli, 2013; Berman et al., 2010; Beraldi et al., 2004). Dans ces modèles, les auteurs supposent que la probabilité de disponibilité des véhicules dans les centres ou la probabilité de demande en véhicules aux points de demande est connue.

Récemment, l'aspect dynamique du problème a été intégré dans les modèles de localisation des SAMU pour tenir compte du redéploiement des capacités (Aringhieri et al., 2017). Ce problème de redéploiement consiste à déplacer les véhicules entre les centres pour faire face à la variation de la demande. Dans ce domaine, Aboueljinane et al. (2013) distingue trois niveaux de décision : long, moyen et court terme. Les décisions à long terme consistent à déterminer la région couverte, l'emplacement et la capacité des centres. Les décisions à moyen terme concernent les décisions de déploiement et l'affectation des véhicules et des ressources. Les décisions à court terme visent à déterminer les règles de répartition, la destination de l'hôpital ou la stratégie de redéploiement.

Dans cette étude préliminaire, nous nous concentrons sur les décisions à moyen terme et nous prenons en compte (1) l'ajustement du plan précédent de déploiement, et (2) l'évolution de la demande et des DP prédéfinis. Par conséquent, le problème étudié peut être considéré comme un problème de redéploiement spécifique et être situé entre le Capacitated Facility Location Problem (CFLP) et le Real Time Redeployment Problem (RTRP).

Les données disponibles auprès du SDIS concernant la demande sont le nombre de VS nécessaires simultanément SDACR35 (2010). De ce fait, nous mettons l'accent sur la prise en compte du DP sous incertitude d'arrivée des accidents au niveau du redéploiement des véhicules à moyen terme qui n'a pas encore été étudiée dans la littérature.

2 BESOIN SIMULTANÉ EN VÉHICULES

L'objectif principal d'un service de secours est d'atteindre le lieu de l'accident le plus rapidement possible. Dans un contexte sans contraintes de ressources, il y aurait suffisamment de véhicules dans chaque CS pour satisfaire la demande de tous les secteurs les plus proches. Dans notre cas, le nombre total de VS est fixe. Avec cette contrainte, les DP déterminent l'ordre des CS à contacter en cas d'accident. Le premier centre d'appel d'un DP est le CS le plus proche du lieu de l'accident. En raison de contraintes de ressources, il est possible que le premier centre d'appel ne soit pas disponible pour faire face à l'accident, c'est pourquoi le deuxième centre d'appel, qui est le deuxième CS le plus proche de l'accident, est appelé. Ce CS est le deuxième CS du DP pour le secteur où l'accident s'est produit. De la même manière, il y a le troisième, puis le quatrième CS du DP et ainsi de suite.

Dans cet article, les DP sont fixes et déterminés comme suit : si le temps moyen pour atteindre un secteur depuis CS1 est inférieur au temps moyen pour atteindre le même secteur depuis CS2, alors CS2 succède à CS1 dans le DP de ce secteur. De plus, le besoin en VS dans chaque CS dépend du nombre d'accidents qui se produisent simultanément dans les secteurs qui ont le même DP. Cette simultanéité des besoins est due à la l'occurrence d'un ou plusieurs accidents nécessitant un ou plusieurs VS à un même instant. Dans notre cas, nous n'avons pas d'information sur chaque accident mais uniquement les besoins simultanés. Cette simultanéité ne définit pas entièrement la l'occurrence des accidents. Ainsi, il existe un ensemble d'occurrences d'accidents, noté $\mathcal{S}$, pour un besoin simultané donné. Cette simultanéité impacte les performances du SDIS en terme de temps attendu pour atteindre les lieux des accidents.

comme le montre l'exemple suivant (eg. 2.1).

Exemple 2.1 *Dans cet exemple, le total des besoins simultanés en VS est égal à* 6*. Seules 2 séquences d'occurrences sont prises en compte (voir figure 1). Nous supposons que* 4 *accidents se sont produits et chacun requiert* 1 *ou* 2 *VS. En d'autres termes,* 6 *VS sont nécessaires simultanément pour secourir les victimes des accidents.*

Pour ces cas, deux accidents (1 Acc et 2 Acc) se sont produits dans le même secteur dont le plan de déploiement est DP a. Ils nécessitent respectivement 2 et 1 VS. Un troisième accident nécessite 2 VS et s'est produit dans un autre secteur dont le plan de déploiement est DP b. Un quatrième accident nécessite 1 VS et s'est produit dans un secteur dont le plan de répartition est DP c.

Ainsi, la simultanéité des besoins des DP a, b et c est respectivement de 3, 2 et 1. Néanmoins, les séquences d'occurrences de ces accidents avec les mêmes besoins simultanés sont différentes. De plus, compte tenu des DP, ces séquences conduisent à différentes affectations aux CS, comme illustré ci-dessous (voir figure 1). Soient les DP suivants qui définissent la

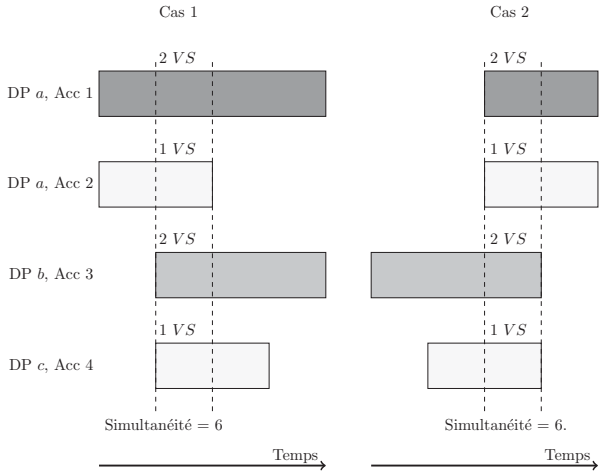


FIGURE 1 – Simultanéité de 6

priorité des différents CS en tant que centres d'appel pour les différents secteurs (chaque DP est associé à un secteur) :

- $a = (CS1; CS2; CS3)$
- $b = (CS2; CS3; CS1)$
- $c = (CS3; CS2; CS1)$

Soient aussi, les temps moyens (en minutes) nécessaires pour qu'un VS d'un CS donné atteigne le lieu de l'accident :

- $(CS1, a)$ =4 ; $(CS1, b)$=10 ; $(CS1, c)$=9
- $(CS2, a)$ =6 ; $(CS2, b)$=3 ; $(CS2, c)$=6
- $(CS3, a)$ =12 ; $(CS3, b)$=5 ; $(CS3, c)$=2

Initialement, 2 *VS sont situés dans* $CS1$*,* 1 *VS dans* $CS2$ *et* 3 *VS dans* $CS3$*.*

Deux exemples d'occurrences d'accidents avec la même simultanéité sont considérés (voir figure 2).

- *Cas 1 : la séquence des occurrences d'accidents est Acc 1, Acc 2 puis Acc 3 et Acc 4.*
- *Cas 2 : la séquence est Acc 3, Acc 4 puis Acc 1 et Acc 2.*

En utilisant les DP, la séquence 1 *donne les résultats suivants (voir le cas 1, figure 2) :*

- 2 *accidents correspondant aux DP a et c sont secourus par le premier centre d'appel, CS1 et CS3, respectivement avec 2 et 1 VS respectivement,*
- 2 *accidents correspondant aux DP a et b sont secourus par le deuxième centre d'appel, CS2 et CS3, respectivement, avec 1 et 2 VS respectivement.*

La séquence 2 (voir le cas 2, figure 2) donne le

résultat suivant :

- 3 *accidents correspondant aux DP* a, b *et* c *sont secourus par le premier centre d'appel, CS1, CS2 et CS3, respectivement, avec respectivement 2, 1 et 1 VS,*
- 1 *accident correspondant à DP* b *est secourus par le deuxième centre d'appel (CS3) avec 1 VS,*
- 1 *accident correspondant à DP* a *est secourus par le troisième centre d'appel (CS3) avec 1 VS.*

Les temps prévus pour atteindre les accidents sont :

- $(4 \times 2 + 6 + 5 \times 2 + 5)/6 \approx 4,34$ *min pour la séquence 1*
- $(4 \times 2 + 3 + 12 + 5 + 2)/6 = 5$ *min pour la séquence 2.*

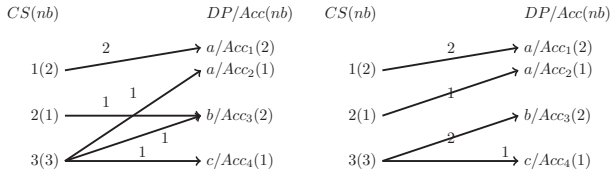


FIGURE 2 – Affectation des VS aux DP

Remarque 1 *Le nombre de VS de CS* i *alloués à DP* π *(notés* $h_{i,\pi}$*) est lié à la séquence d'occurrence des accidents. Dans l'exemple (voir figure 2), la séquence 1 conduit à la solution* $h_{CS1,a} = 2$, $h_{CS2,a} = 1$, $h_{CS3,b} = 2$, $h_{CS3,c} = 1$ *et la solution correspondant à la séquence 2 est* $h_{CS1,a} = 2$, $h_{CS3,a} = 1$, $h_{CS2,b} = 1$, $h_{CS3,b} = 1$, $h_{CS3,c} = 1$. *Dans la section suivante, nous distinguerons le nombre de VS de CS* i *alloués à DP* π *pour les séquences du meilleur et du pire des cas.*

Dans la section suivante, nous présentons notre approche d'optimisation à deux niveaux basée sur les besoins simultanés incertains en VS et l'optimisme du décideur.

3 Redéploiement des capacités en tenant compte de l'optimisme du DM

Notre problème peut être exprimé comme un problème de programmation linéaire à deux niveaux de décision. Le redéploiement des capacités est déterminé lors du premier niveau de décision (avant que la séquence de l'accident ne soit connue), et les affectation des VS aux accidents lors du second (en utilisant la logique DP).

Soit $\mathbb{C}$ l'ensemble des CS, $\text{card}(\mathbb{C}) = c$ et Π l'ensemble des DP. Chaque DP est noté $\pi = (\pi(1), \pi(2), \cdots)$ où $\pi(1)$ est le premier CS à être appelé (niveau 1), $\pi(2)$ le deuxième CS à appeler (niveau 2) si le premier n'a pas de VS disponible, et ainsi de suite. Pour simplifier la notation, nous utilisons $i \succ_\pi j$ lorsque $\pi(a) = i$ et $\pi(a+1) = j$. Pour $i \in \mathbb{C}$ et $\pi \in \Pi$, les données du problème sont :

- $t_{i,\pi}$: le temps nécessaire à un VS de CS i pour atteindre le lieu de l'accident. Si CS i est le premier centre appelé, $t_{i,\pi} = t_{\pi(1),\pi}$,
- D_π : le nombre de VS requis simultanément pour DP π,
- K_i^{init} : le nombre initial de VS d'un CS i,
- K_i^{max} : le nombre maximal de VS que l'on peut affecter à CS i,
- $T_{i,j}^{max}$: le nombre maximal de transfert de VS du CS i à un CS j, $\forall i, j \in \mathbb{C}$,
- T_i^{RC} : le nombre maximal de VS transférables pour un CS i.

Les variables de décision sont des entiers positifs :

- K_i : le nombre de VS affectés au CS i,
- $T_{i,j}$: le nombre de VS transférés de CS i à CS j,
- $h_{i,\pi}^b$: le nombre de VS de CS i alloués au DP π pour la meilleure séquence d'accidents,
- $h_{i,\pi}^w$: le nombre de VS de CS i alloués au DP π pour la pire séquence d'accidents,
- $x_{i,\pi}$: une variable binaire telle que $x_{i,\pi} = 1$ si $h_{i,\pi}^w > 0$.

Sans perte de généralité, nous considérons que le besoin simultané est égal au nombre total de VS sur le secteur considéré. Par conséquent, tous les VS sont utilisés. La formulation mathématique du problème de redéploiement en prenant en compte l'incertitude sur les séquences d'accident est :

$$\min_{\mathbf{K},\mathbf{T}} \quad \alpha \min_{\mathbf{h^b}} \sum_{\pi\in\Pi, i\in\mathbb{C}} t_{i,\pi} h_{i,\pi}^b + (1-\alpha) \max_{\mathbf{h^w}} \sum_{\pi\in\Pi, i\in\mathbb{C}} t_{i,\pi} h_{i,\pi}^w \tag{1}$$

s.t.

$$1.(a) \quad \sum_{i\in\mathbb{C}} K_i = \sum_{i\in\mathbb{C}} K_i^{init}$$

$$1.(b) \quad K_i^{init} + \sum_{j\in\{\mathbb{C}:j\neq i\}} T_{j,i} = K_i, \forall i \in \mathbb{C}$$

$$1.(c) \quad T_{j,i} \leq T_{j,i}^{max}, \forall i, j \in \mathbb{C} : i \neq j$$

$$1.(d) \quad \sum_{j\in\{\mathbb{C}:j\neq i\}} T_{i,j} \leq T_i^{RC}, \forall i \in \mathbb{C}$$

$$1.(e) \quad T_{i,j} = -T_{j,i}, \forall i, j \in \mathbb{C},$$

$$1.(f) \quad K_i^{min} \leq K_i \leq K_i^{max}, \forall i \in \mathbb{C}$$

$$1.(g) \quad \sum_{i\in\mathbb{C}} h_{i,\pi}^b = D_\pi, \forall \pi \in \Pi$$

$$1.(h) \quad \sum_{\pi\in\Pi} h_{i,\pi}^b = K_i, \forall i \in \mathbb{C}$$

$$1.(i) \quad \sum_{i\in\mathbb{C}} h_{i,\pi}^w = D_\pi, \forall \pi \in \Pi$$

$$1.(j) \quad \sum_{\pi\in\Pi} h_{i,\pi}^w = K_i, \forall i \in \mathbb{C}$$

$$1.(k) \quad h_{i,\pi}^w \leq x_{i,\pi} K_i, \forall \pi \in \Pi, \forall i \in \mathbb{C}$$

$$1.(l) \quad x_{i,\pi} + x_{j,\pi'} \leq 1, \forall (i, j, \pi, \pi') \in \mathbb{W}$$

$$1.(m) \quad K_i, T_{j,i} \in \mathbb{N}, x_{i,\pi} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in \mathbb{C}, \pi \in \Pi$$

Les contraintes 1.(a) à 1.(f) sont des contraintes sur

les variables de décision du premier niveau. Plus précisément, la contrainte 1.(a) signifie que le nombre de VS est constant. Les contraintes 1.(b) signifient que la nouvelle affectation de capacité est égale à la somme de la capacité initiale et des VS transférés. Les contraintes 1.(c) définissent le nombre maximal de VS transférables entre deux CS. Les contraintes 1.(d) expriment le nombre maximal de VS qui pourraient être transférés d'un CS. Les contraintes 1.(e) expriment le lien entre le nombre de VS transférés de CS i à CS j et le nombre de VS transférés de CS j à CS i. Les contraintes 1.(f) expriment la contrainte de capacité pour chaque CS.

Le deuxième niveau est composé de deux problèmes. Le premier s'intéresse à l'affectation des VS aux accidents dans le cas où la séquence d'accidents est la plus favorable en terme de temps de secours (contraintes 1.(g) et 1.(h) sur le modèle). Le second se concentre sur l'affectation des VS aux accidents pour la séquence d'accidents la plus défavorable (contraintes 1.(i)-(l) sur le modèle).

Les contraintes 1.(h) et 1.(j) expriment qu'il impossible pour un CS de secourir plus d'accidents que sa capacité.

Ces deux types de contraintes définissent un problème de transport dans lequel $h^b_{i,\pi}$ (resp. $H^w_{i,\pi}$) est le flux de transport en VS vers DP pour la meilleure (resp. la pire) séquence d'accidents.

Les contraintes 1.(k) et 1.(m) où $\mathbb{W} = \{(i,j,\pi,\pi') : \pi,\pi' \in \Pi, i,j \in \mathbb{C} : \pi \neq \pi', i \succ_\pi j, j \succ_{\pi'} i\}$ garantissent que le plan de transport qui concerne la pire séquence d'accidents satisfait la logique DP. Ces contraintes peuvent être omises pour le problème de minimisation qui considère la meilleure séquence car elles sont nécessairement satisfaites.

4 Illustration avec un exemple

Ici, nous illustrons la méthode sur une zone d'un département tel que *la Haute Garonne* (France). Nous considérons 7 CS et 14 DP. Les capacités initiales, maximales et minimales des CS sont :
$K^{init} = (18, 17, 17, 9, 16, 20, 11)$
$K^{max} = (20, 20, 20, 10, 18, 20, 13)$
$K^{min} = (15, 15, 15, 5, 13, 15, 8)$
Les besoins simultanés sont : $D_\pi = (7, 11, 13, 5, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 5, 5, 10, 7)$, et les transferts maximaux pour les CS sont : $T^{CS} = (5, 4, 3, 5, 4, 5, 5)$. Les quantités maximales transférées et les temps sont donnés dans les tableaux (1-2) :

La méthode proposée permet au décideur d'estimer les performances du redéploiement pour la meilleure séquence et la pire. Pour choisir un plan de redéploiement, le décideur calcule un ensemble de solutions optimales avec une plus ou moins

T	$CS1$	$CS2$	$CS3$	$CS4$	$CS5$	$CS6$	$CS7$
$CS1$	0	4	4	2	3	3	3
$CS2$	2	0	2	3	3	1	4
$CS3$	2	1	0	2	1	3	1
$CS4$	3	3	0	0	4	4	0
$CS4$	1	4	3	4	0	2	2
$CS6$	0	0	4	3	0	0	0
$CS7$	3	1	1	4	4	3	0

Tableau 1 – La quantité maximale transférable

π \ CS	1	2	3	4	5	6	7
1	19	15	5	13	3	6	8
2	5	13	18	10	21	16	25
3	14	19	12	8	5	1	6
4	6	5	7	3	12	15	19
5	6	17	5	12	8	9	22
6	18	19	7	3	1	15	11
7	24	20	8	15	12	4	1
8	8	18	14	3	10	19	11
9	5	14	17	15	8	10	1
10	11	19	5	22	16	7	26
11	12	7	23	18	14	4	8
12	3	17	12	19	9	8	6
13	6	5	20	18	11	14	13
14	4	10	8	9	14	17	13

Tableau 2 – Le temps d'arrivée sur un lieu d'accident

forte importance sur les pires/meilleures séquences (en utilisant le paramètre α). Le tableau 3 résume les différents résultats en fonction de $\alpha \in \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$. Le temps moyen d'arrivée sur le lieu de l'accident pour la meilleure séquence est indiquée dans la colonne Opt, et le temps moyen d'arriver sur le lieu pour la pire séquence est présenté dans la colonne Pes. Tout

α	Opt	Pes
$[0.8, 2]$	3min25s	8min35s
$[0.4, 0.7]$	3min28s	8min22s
$[0, 0.3]$	3min31s	8min21s

Tableau 3 – Intervalle des temps moyen possible d'arriver sur le cite des accidents

d'abord, nous pouvons remarquer que les temps prévus pour la meilleure et la pire séquence sont différents. De plus, on ne peut pas optimiser les deux temps attendus car lorsque l'un diminue l'autre augmente. Néanmoins, dans cet exemple, nous n'avons que trois solutions optimales différentes en fonction des paramètres α. Une pour le DM optimiste ($\alpha \in [0.8, 1]$), une pour le DM pessimiste ($\alpha \in [0, 0.3]$) et une autre pour le cas où $\alpha \in [0.4, 0.7]$. On peut voir que (i) si nous optimisons Opt, la meilleure solution correspond au DM optimiste, (ii) si nous optimisons Pes, la meilleure solution est donnée pour un DM pessimiste, et (iii) $CS1$, $CS4$ et $CS6$ sont indépendants du niveau de pessimisme du DM. En revanche, $CS2$ et $CS3$ ont des variations de 3 VS (tableau 4). Nous

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
Initial	18	17	17	9	16	20	11
α	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
$[0, 0.2]$	19	15	18	9	16	19	12
$[0.3, 0.6]$	19	17	15	9	17	19	12
$[0.7, 1]$	19	18	15	9	17	19	11

Tableau 4 – Ensemble de solutions proposé aux décideurs

pouvons voir que la solution, pour $\alpha \in [0.4, 0.7]$, est un bon compromis car elle est juste 1 seconde pire que la solution optimale pessimiste ($\alpha = 1$) et seulement 3 secondes pire que la solution optimale ($\alpha = 0$). De plus l'approche proposée permet au DM de prendre en compte d'autres aspects de la solution comme par exemple les préférences stratégiques et politiques qui, dans un contexte de redéploiement, jouent un rôle important dans l'acceptation d'une solution proposée.

5 Conclusion

Dans ce travail préliminaire, nous avons traité le problème de réaffectation des VS aux CS en fonction de la simultanéité des besoins des VS en tenant compte de l'incertitude sur les séquences d'accident. Le problème étudié est un problème de redéploiement spécifique qui peut être situé entre le problème de localisation de l'installation de couverture et le problème de redéploiement en temps réel. Néanmoins, l'objectif est différent lorsque nous introduisons la notion de DP et la simultanéité des besoins qui n'ont pas été souvent étudiées dans la littérature. Sur la base du critère de Hurwicz, nous proposons une approche d'optimisation à deux niveaux pour faire face à l'incertitude due au besoins simultanés en VS. Dans les travaux futurs, même si le temps de secours est le critère le plus important, nous souhaitons étudier une optimisation multicritères pour prendre en compte le coût de transfert de capacité. Une autre perspective est de coupler la possibilité de modifier le DP avec le redéploiement des capacités puisque le DP impacte la charge de chaque CS. En d'autres termes, nous pourrions changer moins la capacité des CS par rapport à l'affectation initiale en transférant la charge des CS avec une modification des DP.

Références

Abdul Ghani, N. and Ahmad, N. (2017). Analysis of mclp, q-malp, and mq-malp with travel time uncertainty using monte carlo simulation. *Journal of Computational Engineering*, 2017.

Aboueljinane, L., Sahin, E., and Jemai, Z. (2013). A review on simulation models applied to emergency medical service operations. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4) :734–750.

Acuna, J. A., Zayas-Castro, J. L., and Charkhgard, H. (2020). Ambulance allocation optimization model for the overcrowding problem in us emergency departments : A case study in florida. *Socio-Economic Planning Sciences*, 71 :100747.

Akbari, A., Eiselt, H. A., and Pelot, R. (2018). A maritime search and rescue location analysis considering multiple criteria, with simulated demand. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, 56(1) :92–114.

Aringhieri, R., Bruni, M. E., Khodaparasti, S., and van Essen, J. (2017). Emergency medical services and beyond : Addressing new challenges through a wide literature review. *Computers & Operations Research*, 78 :349–368.

Bagherinejad, J. and Shoeib, M. (2018). Dynamic capacitated maximal covering location problem by considering dynamic capacity. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(2) :249–264.

Bélanger, V., Ruiz, A., and Soriano, P. (2019). Recent optimization models and trends in location, relocation, and dispatching of emergency medical vehicles. *European Journal of Operational Research*, 272(1) :1–23.

Beraldi, P., Bruni, M. E., and Conforti, D. (2004). Designing robust emergency medical service via stochastic programming. *European Journal of Operational Research*, 158(1) :183–193.

Berman, O., Drezner, Z., and Krass, D. (2010). Generalized coverage : New developments in covering location models. *Computers & Operations Research*, 37(10) :1675–1687.

Boutilier, J. J. and Chan, T. C. (2020). Ambulance emergency response optimization in developing countries. *Operations Research*.

Carbone, R. (1974). Public facilities location under stochastic demand. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, 12(3) :261–270.

Chow, J. Y. and Regan, A. C. (2011). Resource location and relocation models with rolling horizon forecasting for wildland fire planning. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, 49(1) :31–43.

Church, R. and ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in regional science*, 32(1) :101–118.

Cordeau, J.-F., Furini, F., and Ljubić, I. (2019). Benders decomposition for very large scale partial set covering and maximal covering location problems. *European Journal of Operational Research*, 275(3) :882–896.

Daskin, M. S. (1983). A maximum expected covering location model : formulation, properties and heuristic solution. *Transportation Science*, 17(1) :48–70.

Dell'Olmo, P., Ricciardi, N., and Sgalambro, A. (2014). A multiperiod maximal covering location model for the optimal location of intersection safety cameras on an urban traffic network. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 108 :106–117.

Grannan, B. C., Bastian, N. D., and McLay, L. A. (2015). A maximum expected covering problem for locating and dispatching two classes of military medical evacuation air assets. *Optimization Letters*, 9(8) :1511–1531.

Haight, R. G. and Fried, J. S. (2007). Deploying wildland fire suppression resources with a scenario-based standard response model. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, 45(1) :31–39.

Hulshof, P. J., Kortbeek, N., Boucherie, R. J., Hans, E. W., and Bakker, P. J. (2012). Taxonomic classification of planning decisions in health care : a structured review of the state of the art in or/ms. *Health systems*, 1(2) :129.

Li, M., Vanberkel, P., and Carter, A. J. (2019). A review on ambulance offload delay literature. *Health care management science*, 22(4) :658–675.

MacLellan, J. I. and Martell, D. L. (1996). Basing airtankers for forest fire control in ontario. *Operations Research*, 44(5) :677–686.

McCormack, R. and Coates, G. (2015). A simulation model to enable the optimization of ambulance fleet allocation and base station location for increased patient survival. *European Journal of Operational Research*, 247(1) :294–309.

Naoum-Sawaya, J. and Elhedhli, S. (2013). A stochastic optimization model for real-time ambulance redeployment. *Computers & Operations Research*, 40(8) :1972–1978.

ReVelle, C. and Hogan, K. (1989). The maximum availability location problem. *Transportation Science*, 23(3) :192–200.

ReVelle, C. S. and Swain, R. W. (1970). Central facilities location. *Geographical analysis*, 2(1) :30–42.

SDACR35 (2010). Schéma départemental d'analyse et de couverture. Technical report, SDIS35.

Serra, D. and Marianov, V. (1998). The p-median problem in a changing network : the case of barcelona. *Location Science*, 6(1-4) :383–394.

Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., and Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations research*, 19(6) :1363–1373.

Vatsa, A. K. and Jayaswal, S. (2016). A new formulation and benders decomposition for the multi-period maximal covering facility location problem with server uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 251(2) :404–418.

Zhang, B., Peng, J., and Li, S. (2017). Covering location problem of emergency service facilities in an uncertain environment. *Applied Mathematical Modelling*, 51 :429–447.

INDUSTRIE DU FUTUR : AIDE A L'IDENTIFICATION DES PHENOMENES DANGEREUX LORS DE LA CONCEPTION DE MACHINES FLEXIBLES

B. DAILLE-LEFEVRE, J. MARSOT

Institut national de recherche et de sécurité (INRS),1 rue du Morvan, 54519 Vandoeuvre- les-Nancy cedex, France
bruno.daille-lefevre@inrs.fr, jacques.marsot@inrs.fr

P. MARTIN

Arts et métiers (Ensam), campus de Metz, LCFC, 4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz, France
patrick.martin@ensam.eu

RESUME : *Les concepteurs de machines industrielles doivent légalement évaluer les risques qu'elles présentent, ce qui passe obligatoirement par l'identification des phénomènes dangereux mis en jeu. Pour les aider dans cette tâche, le modèle EZID (Energy analysis for systematic haZard Identification during Design) a été imaginé. Celui-ci se base sur le postulat suivant : les phénomènes dangereux n'existent qu'en présence d'énergies. Dans ce cas, identifier les phénomènes dangereux revient à suivre les flux d'énergies entrants dans la machine, transmis d'un élément à l'autre, diffusés ou transformés. Si la pertinence de ce modèle a été montrée dans le cadre de la conception d'une machine spéciale mono tâche, qu'en est-il lorsqu'il est appliqué sur des machines flexibles répondant au paradigme de l'industrie du futur ? C'est à cette question que tente de répondre cet article. Pour ce faire, la méthode EZID a été appliquée à un cas réel de conception d'un îlot de fabrication flexible. Les résultats sont également comparés à ceux obtenus avec une méthode classique d'identification des phénomènes dangereux.*

MOTS-CLES : *Gestion des risques, Phénomène dangereux, Conception / Innovation, Industrie 4.0, Santé et sécurité.*

1 INTRODUCTION

En Europe, la sécurité des machines mises sur le marché est réglementée par la « directive machines » (European parliament and council, 2006) et elle est retranscrite dans les textes de loi des pays membres. Cette directive est applicable quel que soit le paradigme industriel. Le concept d'« industrie du futur » n'échappe donc pas à cette règle. Charge aux concepteurs de machines de répondre en tous points à ces exigences de santé et sécurité vis-à-vis des utilisateurs de ces machines. Pour aider ces concepteurs, la directive « machines » présente un synoptique pour identifier, évaluer puis réduire les risques potentiellement présents sur une machine.

Si plusieurs méthodes ont été proposées pour assister les concepteurs dans cette action (Lamy P. et Charpentier P, 2009 ; Gauthier *et al*., 2018), elles portent pour la plupart sur l'étape finale d'évaluation. Inversement, l'étape initiale d'identification des phénomènes dangereux est peu outillée. Les experts s'appuient alors généralement sur une liste exhaustive des risques (NF EN ISO 12100, AFNOR, 2010) et repèrent ceux présents sur la machine. Afin de pallier ce manque, la méthode, EZID (Energy analysis for systematic haZard Identification during Design) est proposée par De Galvez (De Galvez N. *et al*., 2017).

Cette méthode, mise au point dans un cadre industriel classique, offre-t-elle la même aide au concepteur confronté aux attentes de l'industrie du futur (FOF, 2013), (Veltz P. et Weil T., 2015) ? C'est la question à laquelle va tenter de répondre cet article, confrontant l'utilisation d'EZID pour la conception d'un îlot de production flexible répondant aux critères de l'industrie du futur. Les résultats seront comparés avec ceux obtenus par une analyse classique basée sur l'utilisation d'une liste des phénomènes dangereux.

2 CONTEXTE

2.1 Démarche de prévention intégrée

Comme indiqué en introduction, ces travaux s'inscrivent dans le cadre de la mise en application de la démarche de prévention intégrée qui fixe comme objectif aux concepteurs de machines d'obtenir le niveau de risque résiduel le plus faible possible compte tenu de l'état de la technique. Elle s'articule autour de 2 processus, celui de l'« appréciation des risques » et celui de la « réduction des risques » (cf. Figure 1).

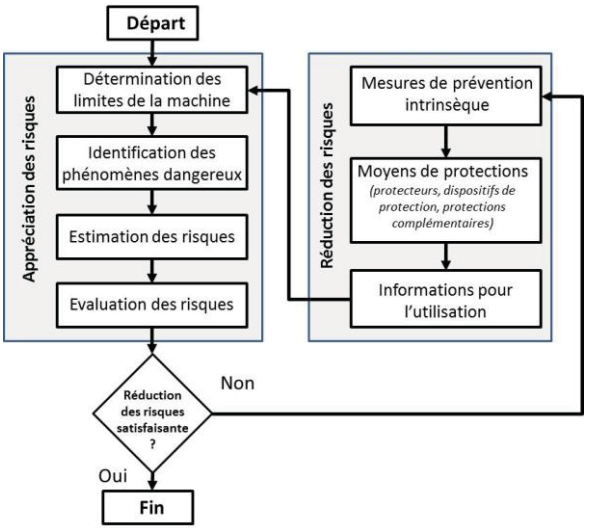


Figure 1 : représentation simplifiée de la démarche de prévention intégrée

Il est donc demandé aux concepteurs de machines, tout au long du processus de conception, de répertorier tous les phénomènes dangereux présent, en s'appuyant par exemple sur la liste des phénomènes dangereux donnée en annexe de la norme NF ISO EN 12100 (AFNOR, 2010), puis de les évaluer avant de les éliminer ou les réduire. De plus, il leur est demandé d'envisager pour cela tous les cas d'utilisation de la future machine, y compris ce que la directive « machines » appelle les « mauvais usages raisonnablement prévisibles [1]».

Les retours d'expérience de la part des entreprises qui conçoivent des machines spéciales, et qui pour la plupart appartiennent à des PME, montrent que l'identification des phénomènes dangereux s'appuie le plus souvent sur le savoir-faire et les connaissances des concepteurs eux-mêmes avec parfois le recours à un expert en sécurité des machines (Marsot J., 2015). En ce qui concerne l'établissement des scénarios d'usages, on constate également qu'il se limite le plus souvent aux modes de fonctionnement principaux (production) dans les conditions nominales usages.

2.2 Industrie du Futur

A ce cadre légal, évoqué dans le paragraphe précédent, s'ajoute désormais un nouveau paradigme industriel à prendre en compte par le concepteur : l'industrie du futur. Ce concept est vaste mais peut se synthétiser dans le domaine des équipements de travail à une plus grande flexibilité. L'objectif visé est une adaptation rapide des moyens et des ressources aux demandes de produits à réaliser, en termes de volumes, de variantes, de personnalisation. Cette flexibilité entraîne pour les concepteurs la nécessité de prendre en compte un nombre conséquent de scénarios d'usages.
A cette difficulté, s'ajoute l'identification des nouveaux risques pouvant être introduits par les technologies de production avancées qui supportent cette flexibilité (robots mobiles, collaboratifs, fabrication additive, etc.) (Martin P. *et al*, 2019).

En conclusion de ce chapitre, l'exhaustivité demandée dans l'identification des scénarios d'usage et des phénomènes dangereux est de la responsabilité des concepteurs de machines et elle s'ajoute aux difficultés déjà nombreuses auxquelles ils sont confrontés (qualité, coûts, délais, etc.). Tout outil ou démarche pouvant le guider sera donc apprécié, tant pour définir les usages de la machine que pour identifier les phénomènes dangereux.
En ce qui concerne l'identification des usages, cette problématique ne sera pas abordée dans cet article. Il faut toutefois noter qu'il existe plusieurs méthodes et techniques issues de l'ergonomie déclinées sous la forme de modèle en vue d'être intégré au processus de conception (Sun *et al*., 2019 ; Demarziani A. *et al*., 2019). La suite de cet article sera donc centrée sur la problématique d'identification des phénomènes dangereux.

3 EZID (Energy Analysis For Systematic Hazard Identification During Design)

Pour aider le concepteur de machines à répertorier de façon systématique les phénomènes dangereux, Nicholas De Galvez (De Galvez N. *et al*., 2017), a proposé une démarche dénommée EZID (Energy analysis for systematic haZard Identification during Design). Elle repose sur le postulat que les phénomènes dangereux ne se manifestent qu'en présence d'énergie mécanique, électrique, hydraulique, gravitationnelle… ou humaine. L'identification des phénomènes dangereux se résume alors à celle des énergies entrant dans la machine et au suivi de leur transmission et transformation entre les éléments la constituant.
Pour mettre en œuvre cette démarche, De Galvez s'est notamment appuyé sur le modèle fonctionno-structurel (Constant D., 1996). Initialement développé pour l'analyse de système complexe, ce modèle basé sur la notion de circulation des flux d'énergies a été complété pour la conception de produit (Roucoules L. *et al*., 2006). Comme représenté par la figure 2 ci-après, ce modèle repose sur quatre éléments de représentation :

- une frontière qui délimite un composant,
- des surfaces fonctionnelles qui désignent les interfaces par lesquelles le composant a des relations avec son environnement,
- des liaisons qui associent deux surfaces fonctionnelles n'appartenant pas au même composant
- les associations internes qui associent deux surfaces fonctionnelles appartenant à un même composant.

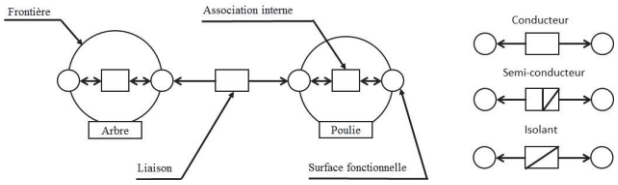


Figure 2 : Choix graphique du modèle fonctionno-structurel de Constant (Constant D., 1996)

4 CAS D'APPLICATION

Dans le but d'explorer les spécificités et les conséquences du contexte d'industrie du futur vis à vis de la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, l'INRS a engagé un projet de recherche associant sciences de l'ingénieurs et sciences humaines. Un des axes de ce projet mené en collaboration avec l'ENSAM[2] porte sur la conception d'un îlot flexible de production. Le but de cet axe est bien, de l'écriture du cahier des charges jusqu'à sa réalisation, de repérer et de pallier les difficultés précédemment évoquées à savoir l'identification de l'ensemble des phénomènes dange-

1 Usages, intentionnels ou non, prévisibles sur la base de l'expérience de l'utilisation antérieure de machines similaires et de la connaissance du comportement humain

2 LC2S : Laboratoire mixte pour la Conception Sûre de Situations de travail

reux en envisageant l'ensemble des usages raisonnablement prévisibles de la future machine.
Pour ce faire, il a été imaginé une combinaison de deux postes de travail travaillant sur un même ensemble de pièces (cf. figure 3) mais pouvant s'adapter à des modes opératoires différents.

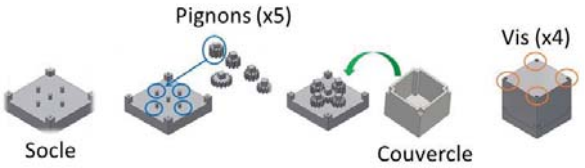


Figure 3 : illustration de la tâche d'assemblage envisagée

De même, pour illustrer la flexibilité en termes de ressources, l'un des postes peut être tenu par un opérateur ou par un robot collaboratif (cf. Figure 5).

Cela donne au final six scénarios d'usages différents, allant du simple partage d'espace de travail, à de la collaboration indirecte ou directe nécessitant la participation de l'ensemble des ressources, humaines ou robotisée, à la réalisation de la même tâche. Les autres flexibilités décrites dans l'usine du futur (organisationnelle, diversité des produits ou des moyens de production…) n'ont pas été retenues, dans un but de simplification de l'étude (focalisation sur certains points).

5 APPLICATION D'EZID

Pour rappel, la méthode EZID permet d'identifier les phénomènes dangereux présents sur une machine en suivant les flux d'énergies. Cette identification revient donc à celle des surfaces fonctionnelles. Elles représentent en effet les interfaces par lesquelles sont échangées les énergies dans le système. Des liaisons « isolantes » doivent donc être envisagées par le concepteur pour éviter ou réduire les échanges d'énergies entre ces surfaces fonctionnelles et les opérateurs.

Nous développons ci-après le résultat de l'application d'EZID lors des phases de spécifications et conception architecturale de cet ilot pour les six scénarios d'usage de la phase de production évoquée précédemment. L'analyse des autres phases de vie (montage, maintenance, réglage, démontage) n'est pas abordée dans cet article.

5.1 Phase de spécifications

Les différents éléments connus à ce stade sont les pièces à assembler : socle, couvercle, pignons, vis et l'ensemble monté. L'ilot peut également être ajouté en tant qu'objet à concevoir. Selon les principes définis par EZID, chacun de ces éléments présentent par défaut les risques potentiels suivants (cf. figure 4) :

- risques mécaniques (choc, coupure, piqure) dus à la forme (arêtes vives par exemple) des pièces en cas de contact (énergie mécanique apportée par l'opérateurs (Surfaces Fonctionnelles 7 à 12)
- risques mécaniques (choc écrasement en cas de chute ou basculement) dus à l'énergie potentielle de la masse des pièces et de l'îlot (SF 1 à 6)
- risques « chimiques » liés aux matériaux utilisés pour ces produits (SF 13 à 18)

Par ailleurs, comme il est envisagé de réaliser manuellement l'approvisionnement, l'évacuation ainsi que tout ou partie de l'assemblage des pièces, les risques potentiels liés au non-respect des principes ergonomiques (SF 19 à 23) sont à envisager pour ces opérations.

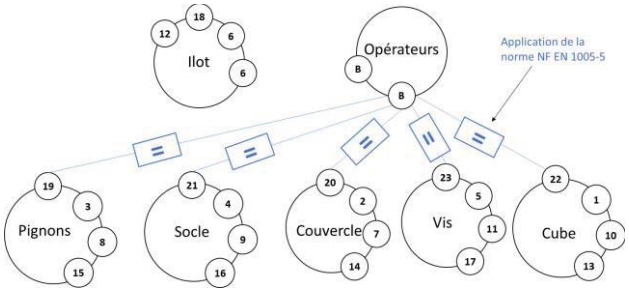


Figure 4 : Modèle énergétique à l'issue de la phase de spécification

Cette première analyse permet d'identifier 23 surfaces fonctionnelles, donc 23 phénomènes dangereux : 15 peuvent déjà être considérés comme traités. Les données disponibles sont à ce stade insuffisantes pour évaluer les 8 autres (cf. tableau I). A noter qu'à ce stade, les surfaces fonctionnelles identifiées sont indépendantes des scénarios d'usages.

SF	Energie	Mesures de protection
1	Masse Cube	La masse est suffisamment faible. Aucune mesure de protection requise
2	Masse Couvercle	
3	Masse Pignons	
4	Masse Socle	
5	Masse Vis	
6	Masse Ilot	Non connu à ce stade
7	Forme Couvercle	Mesure de protection : suppression des angles vifs
8	Forme Pignons	
9	Forme Socle	
10	Forme Cube	
11	Forme Vis	
12	Forme Ilot	Non connu à ce stade
13	Matériau cube	Utilisation de matériau inerte
14	Matériau Couvercle	
15	Matériau Pignons	
16	Matériau Socle	
17	Matériau Vis	
18	Matériau Ilot	Non connu à ce stade
19	Bioméca Pignons	Données insuffisantes pour appliquer la norme NF EN 1005-5
20	Bioméca Couvercle	
21	Bioméca Socle	
22	Bioméca Cube	
23	Bioméca Vis	

Tableau 1 : Liste des phénomènes dangereux identifiés en phase de spécifications

5.2 Phase de conception architecturale

Parmi plusieurs schémas d'implantations possibles, la conception architecturale retenue pour l'ilot est la sui-

vante (cf. figure 5), répondant à la fois aux spécifications initiales du projet et aux caractéristiques géométriques (zones d'atteintes notamment) des robots commercialisés dans la gamme adaptée à la masse du produit à déplacer :

- 2 postes de travail distincts reliés mécaniquement. Un poste est toujours tenu par un opérateur, l'autre peut être tenu par un opérateur ou robotisé à l'aide d'un robot monté sur une plateforme déplaçable (en lieu et place de l'opérateur)
- Déplacement des socles, couvercles et cubes le long des postes par gravité sur de goulottes inclinées pour une évacuation ou alimentation par un 3e opérateur.

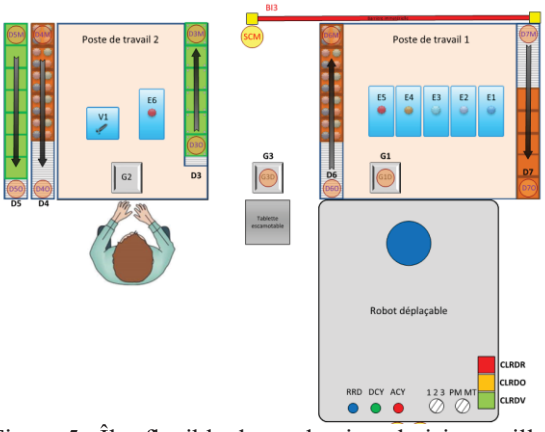


Figure 5 : Îlot flexible de production choisi pour illustrer le concept d'usine du futur

Avec ces nouvelles données de conception, des mesures de protection peuvent être envisagées pour certains des phénomènes dangereux identifiés précédemment, en particulier, les risques de TMS liés aux 3 modes opératoires manuels des postes 1 et 2 (SF 19 à 23) peuvent être évalués à l'aide de la norme NF EN 1005-5 (AFNOR, 2008) car on connait les dimensions des postes, le positionnement approximatif des pièces, les modes opératoires et le temps de cycle. Les risques liés à la masse (SF 6), forme (SF 12) et matériaux (SF 18) des postes peuvent également être évalués.

Par ailleurs, l'analyse des 6 scénarios envisagés se traduit avec ces nouvelles données par celle de 2 modèles énergétiques :

- un modèle avec les 2 postes de montage manuels (cf. figure 6). Par rapport au modèle précédent, les seules énergies supplémentaires sont celles de l'opérateur 3 pour l'alimentation/évacuation des pièces et l'énergie potentielle des cubes, couvercles et socle pour leur déplacement le long des postes. Cette configuration recouvre les 3 scénarios de montage totalement manuels d'utilisation.

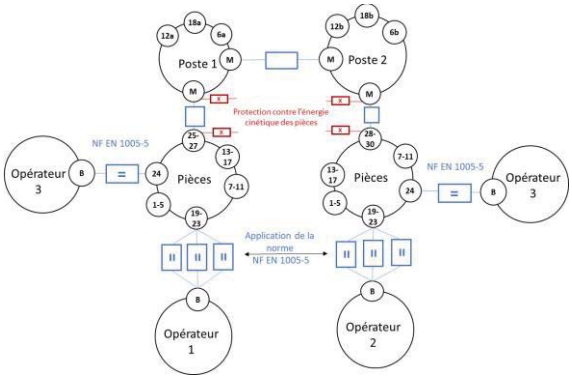


Figure 6 : Modèle énergétique simplifié pour la phase de production manuelle

- un second modèle pour les 3 scénarios de montage avec un poste tenu par un robot (cf. figure 7). Par rapport à la configuration précédente s'ajoute les risques liés aux robots et à la pince (alimentation électrique, formes, masses, matériaux et mouvements).

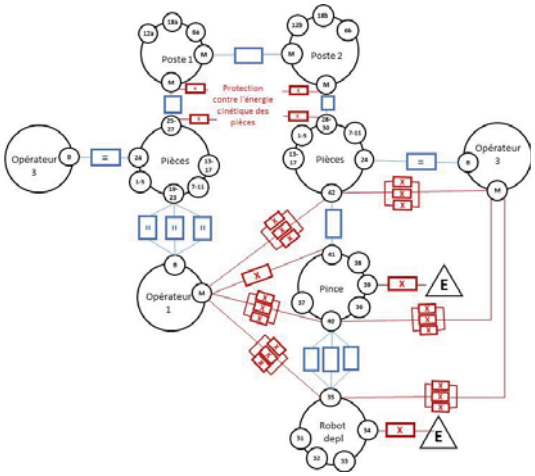


Figure 7 : Modèle énergétique simplifié pour la phase de production avec un robot

Par rapport à l'analyse précédente, 18 nouvelles surfaces fonctionnelles, ou phénomènes dangereux, sont à prendre en compte (cf. tableau II). A noter que 7 d'entre elles sont communes aux 2 confirgurations (en grisé).

SF	Energie	Commentaires Mesures de protection
24	Bioméca opérateur 3	Application de la norme NF EN 1005-5
25 26 27	Dépl. Socle, Cube, Couvercle poste 1	Pas de mesure de protection spécifique : Energie faible du fait de la masse des pièces, de la faible distance et de la pente envisagée pour ces déplacements par gravité
28 29 30	Dépl. Socle, Cube, Couvercle poste 2	
31	Forme Robot déplaçable	Forme contondante sans angle vifs (déjà pris en compte par le fabricant)
32	Masse Robot déplaçable	Equipement stable : socle lesté. Avec possibilité de verrouillage au sol
33	Matériau Robot déplaçable	Pas d'utilisation de matériau dangereux
34	Risque électrique Robot déplaçable	Voir mesure prise par le fabricant et l'intégrateur
35	Risque mécanique	Prévoir un moyen de protection évi-

	mouvement robot (x3 scénarios)	tant les collisions avec l'opérateur 1 et l'opérateur 3 (pour les 3 scénarios)
36	Masse pince	Masse faible
37	Forme Pince	Forme sans angle vifs
38	Matériau Pince	Matériau inerte
39	Risque électrique Pince	Voir mesure prise par le fabricant et l'intégrateur
40	Risque mécanique fermeture pince	Fonction limitation de puissance lors de la fermeture
41	Risque mécanique mouvement pince (x3 scénarios)	Prévoir un moyen de protection évitant les collisions avec l'opérateur 1 et l'opérateur 3 (pour les 3 scénarios)
42	Risque mécanique mouvement pièces (x3 scénarios)	Prévoir un moyen de protection évitant les collisions avec l'opérateur 1 et l'opérateur 3 (pour les 3 scénarios)

Tableau II : Liste des phénomènes dangereux supplémentaires identifiés en conception architecturale

On constate également sur ces modèles que pour prendre en compte les différences entre les scénarios, il est nécessaire, pour certaines surfaces fonctionnelles, de prévoir plusieurs liaisons en parallèle, chacune étant spécifique à un scénario. C'est par exemple le cas pour les mouvements du robot qui sont différents dans les 3 scénarios (liaison SF35-SF40). Cela implique de prévoir également des liaisons « isolantes » de protection différentes et compatibles entre elles, d'où leur représentation également en parallèle.

6 DISCUSSION

Comme l'avait montré N. De Galvez (De Galvez N. *et al*., 2017), le modèle EZID, et plus particulièrement l'étape de modélisation énergétique, peut être appliqué aux différentes étapes du processus de conception d'une nouvelle machine pour l'identification des phénomènes dangereux.

En effet, parallèlement à l'utilisation du modèle EZID, une identification des phénomènes dangereux a été réalisée par des experts en sécurité machines. Cette analyse a été réalisée de façon classique en confrontant le projet de conception architecturale à la liste des phénomènes dangereux de la norme NF EN 12100 (AFNOR, 2010) (cf. tableau III).

Lorsque l'on compare cette identification, à celle obtenue à partir des modèles énergétiques, on constate une bonne concordance entre les deux analyses (cf. tableau IV).
Les phénomènes dangereux mécaniques liés au lâché (n°3) ou à l'éclatement (n°4) de la pièce tenue dans la pince n'ont toutefois pas été identifiés par l'analyse avec EZID. Cette difficulté d'identifier des risques liés à une libération d'une énergie suite à une défaillance ou un dysfonctionnement avait en effet déjà été identifiée par De Galvez, EZID n'effectuant pas une analyse dysfonctionnelle de la machine. Celle-ci pourrait venir en complément, sous la forme d'une AMDEC par exemple.
Inversement, les surfaces fonctionnelles 1 à 5 (énergie potentielle liée à la masse des pièces à assembler), 13 à 18, 33, 38 (matériau des pièces et de l'ilot) et 25 à 30 (énergie cinétique des cubes, socles et couvercles lors de leur déplacement par gravité), n'apparaissent pas dans ce tableau comparatif. Il s'agit en effet de phénomènes dangereux potentiels non significatifs, c'est à dire qui ne nécessitent pas de mesures de prévention spécifique. Ils apparaissent avec la méthode EZID du fait de son caractère systématique alors qu'ils ont été directement filtrés par les experts.

N°	Ph. dangereux / Dommage	Situation considérée
1	Mécanique / Choc Ecrasement	Renversement sur un opérateur ou une tierce personne de la plateforme déplaçable du fait des mouvements du robot.
2	Mécanique / Choc, coupure, piqure	Contacts entre une personne et les éléments mécaniques du robot déplaçable à l'arrêt
3	Mécanique / Choc	Risques pour un opérateur ou une tierce personne en cas de d'éjection de la pièce tenue dans la pince (serrage insuffisant)
4	Mécanique / Choc	Risques pour un opérateur ou une tierce personne en cas de d'éclatement de la pièce (serrage trop fort)
5	Mécanique / Choc, Ecrasement	Collision d'une partie du robot en mouvement avec un opérateur ou une tierce personne à proximité
6	Mécanique / Choc ou coincement	Coincement de l'opérateur ou d'une personne tierce entre les articulations du robot
7	Mécanique / Ecrasement	Fermeture de la pince sur les doigts d'un opérateur ou une tierce personne
8	Electrique	Intervention du personnel sur les équipements électrique
9	Non respects de principes ergo.	Risque TMS associés aux opérations manuelles (assemblage, alim/évac)

Tableau III : Liste des phénomènes dangereux identifiés à partir de la liste des phénomènes dangereux

N° selon tableau III	Surfaces fonctionnelles (Tableau I et II)
1	SF 6 – SF 32 – SF 36
2	SF 7 à 12 - SF 31 - SF 37
3	
4	
5	SF 35 – SF 41 – SF 42
6	SF 35
7	SF 40
8	SF 34 – SF 39
9	SF 19 à 24

Tableau IV : comparaison des deux analyses (EZID et liste de phénomènes dangereux).

Par rapport à la problématique de flexibilité associée au paradigme de l'Industrie du futur, on constate, pour le cas d'aplication envisagé, que l'analyse des 6 scénarios d'usage se résume à celle de seulement 2 configurations énergétiques.
Le postulat retenu pour EZID qui est d'associer énergie et phénomènes dangereux semble en effet contribuer à une optimisation des analyses à réaliser en cas de multiples scénarios d'usage
Le modèle énergétique d'une situation de travail, qui sert de point de départ à EZID, est par définition représentatif des phénomènes dangereux présents quel que soit le scénario d'usage. Si les flux d'énergies, donc les

phénomènes dangereux, sont les mêmes dans différents scénarios, il n'y aura logiquement qu'un seul modèle énergétique, donc une seule analyse pour l'identification des phénomènes dangereux.
Si les flux d'énergie sont différents entre deux scénarios, alors plusieurs modèles énergétiques seront nécessaires. La comparaison de ces modèles entre eux permet toutefois d'identifier rapidement les surfaces fonctionnelles communes, c'est-à-dire les phénomènes dangereux communs aux scénarios concernés. Par exemple dans la situation présentées dans cet article, 30 surfaces fonctionnelles sont communes sur les 42 couvrant les 2 modèles énergétiques, eux-mêmes couvrant les 6 scénarios d'usage.

7 PERSPECTIVES

Les travaux sur la problématique de la mise en application de la démarche de prévention intégrée dans le contexte de l'industrie du futur se poursuivent.
Ainsi la démarche EZID sera appliquée en phase de conception détaillée du cas exemple retenu en intégrant dans le(s) modèle(s) énergétique(s) les choix de conception finaux ainsi que les moyens de protection envisagés.
Parallèlement à ces travaux sur l'identification des phénomènes dangereux, une étude est menée sur l'identification de fonctions élémentaires, constitutives des machines industrielles. Le but serait de procéder à une analyse des risques appliquée à chacune de ces fonctions, seules, en interaction avec les parties prenantes de la machine ou en interaction avec les autres fonctions, pour balayer ainsi tous les usages possibles et se conformer au paradigme d'industrie du futur.
D'autre part ces flux d'énergie agissent dans un espace limité, ces volumes d'influence peuvent être identifiés et limités afin de prévenir les accidents. L'association flux d'énergie et volume d'influence peut ainsi être représentée au niveau des modèles CAO et aider le concepteur d'équipements de production dans sa démarche de prévention intégrée (Gomez -Echeverri J.C. et al., 2019).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient James Baudouin, Jean-Paul Bello, Adel Sghaier et David Tihay (INRS) pour leur avoir transmis leur analyse des risques de l'îlot flexible, pris ici en exemple.

REFERENCES

AFNOR, 2008. NF EN 1005, *Safety of machinery - Human physical performance*.

AFNOR, 2010. NF EN ISO 12100 - *Safety of machinery, General principles for design.*

Constant D., 1996. *Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques*. *Thèse*, Université de Grenoble 1.

De Galvez N., Marsot J., Martin P., Siadat A., Etienne A., 2017. *A new approach to hazard identification during the design process by analysing energy transfers*. Safety Science, 95, Elsevier, pp. 1–14.

Demaziani A., Etienne A., Daille Lefèvre B., 2019, *Towards a data model to describe future usages of industrial systems to integrate Health and Safety in early design phase*. colloque S-mart 1/7, Les Karellis, 3 au 5 avril 2019, 7 p.

European parliament and council, 2006. Directive of the European parliament and of the council of 17 May 2006 on machinery and amending Directive95/16/EC (recast). OJ L157, pp. 24-86.

FOF, Factories of the future, 2013. *Strategic Multi-annual roadmap for the contractual PPP under horizon 2020*, European commission, Directorate-General for Research and Innovation, Directorate G - Industrial Technologies, Unit G.2 - 'New forms of production'.

Gauthier et al. 2018. *Risk assessment in safety of machinery: Impact of construction flaws in risk estimation parameters,* Safety Science, Volume 109, 2018, pp. 421-433.

Gomez Echeverri J.C, Martin P, Daille-Lefevre B., Godot X., Marsot J., 201). « Prise en compte dans la conception et l'exploitation des postes de travail de l'usine du futur des aspects sante – securite », 16 ème colloque nationale S.Mart, Les Karellis (73), 3-5 avril 2019, 7 pages.

Lamy P. et Charpentier P., 2009. *Estimation des risques machines : recensement des méthodes et subjectivité des paramètres de l'estimation*, INRS, HST 214, pp. 37-44.

Lux A. et Quillerou-Grivot E., 2014. *Production activity analyzed by an engineer and a psychologist: what contributions for taking health into account when designing production systems.* MOSIM; Nancy, France.

Marsot J., 2015. *Prévention intégrée : quelles sot les pratiques des concepteurs de machines*, INRS, HST 235, pp. 52-58

Martin P. *et al.*, 2019. *New Issues for Workers Safety in the Factory of the Future.* Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing, pp 402-411.

Roucoules L. *et al.*, 2006. *Une approche au juste nécessaire de l'intégration métier, en conception vers des solutions alternatives innovantes*. Ingénierie de la conception et cycle de vie des produits. Edition HERMES.

Sun X. *et al.,* 2019. *A review of methodologies for integrating human factors and ergonomics in engineering design*. International Journal of Production Research . vol 57, issue 15-16, pp. 4961-4976.

Veltz P. et Weil T., 2015. *L'industrie, notre avenir*, La Fabrique de l'Industrie, Eyrolles 2015, ISBN : 978-2-212-56115-9.

END OF LIFE MANAGEMENT OF COMPLEX PRODUCTS IN AN INDUSTRY 4.0 DRIVEN AND CUSTOMER-CENTRIC PARADIGM: A RESEARCH AGENDA

Samira KEIVANPOUR
Polytechnique Montreal, Montreal, Quebec, Canada, samira.keivanpour@polymtl.ca

ABSTRACT: Today, developing tools and methods for advanced management of the complex product through their life cycle in the new paradigms of sustainability, manufacturing, and information technology is essential. The new trends in manufacturing, information technology, and logistics influence the circular economy. The long-term goal is to provide the recycling companies, manufacturers, and the other key players in the life cycle management of the complex products with tools and methods for analyzing the implications of these new trends and support the robust circular economy. In this article, the influence of Industry 4.0 and the customer-centric paradigm on the management of the complex products at the EoL is discussed. The examples of the applications in End of Life (EoL) aircraft treatment are also provided to shed light on the discussion. This perspective article aims to outline the research agenda that addresses some of the research questions in the current and future of advanced management of the complex products at the end of life.

KEYWORDS: *Circular economy, Industry 4.0, Customer-centric paradigm, EoL product management, research agenda*

1 INTRODUCTION

Today, more consumers around the world consider the environmental and social responsibility of producers and take into account the sustainability in their purchasing decision-making. In the new paradigm of sustainability, the circular economy is defined as "a regenerative system in which resource input and waste, emission, and energy leakage are minimized by slowing, closing, and narrowing material and energy loops. This can be achieved through long-lasting design, maintenance, and repair, reuse, remanufacturing, refurbishing, and recycling" (Geissdoerfer, 2017, P.759). This proactive approach to sustainability should be integrated into new paradigms in manufacturing, emerging technologies, and the new trends in business. The emerging trends affect the circular economy and life cycle modeling. There are some significant trends and challenging areas: The global peak population and evolving global landscape as well as an emerging technology. The growing population changes the rate of product consumption and the uncertainty in supply and demand for recycled materials. It triggers the new federal or provincial regulations for end of life products treatment and cradle to grave practices. Evolving global context influence the complexity of the product recovery network, the relationship among key players, and life cycle modeling. Furthermore, consumers need more customized products. These trends cause growing open-architecture and complex consumer products as well as the need for developing the novel methods and tools for design and material chain strategy. The costs, engineering aspects, subsystems, networks, and constructs define the complexity of the products. Moreover, the interaction between design features, construction, technology, suppliers, and legislation affect the degree of complexity. Disruptive technologies such as Industry 4.0, Internet of things, big data, and 3D printing change paradigm in the supply chain context. The new paradigm of Industry 4.0 affects the green supply chain includes green design, green manufacturing and remanufacturing, reverse logistics, and waste management. Examination and adoption of the Internet of things (IoT) and big data analytics in the product recovery network and the role of embedded real-time data are essential. The opportunities and challenges for designing the product recovery networks and assessing the dynamic interactions among entities could reveal the creating value through these new technologies. In this article, the implications of Industry 4.0 and the customer-centric paradigm on the management of the complex products at EoL are discussed. The contribution of this study is two folds: first, it summarizes the state of the art of the EoL products management in the context of Industry 4.0 and considering the new trends in product design. Second, it provides a research agenda in the field with some examples from the case of EoL aircraft. The rest of the paper is organized as follows: Section 2 discusses the different types of products and the impacts of the evolution in product development on the complexity of EoL management. Section 3 reviews the implications of Industry 4.0 with some examples in data analytics deployment, virtual reality, and distributed network in the case of EoL aircraft and the perspectives of future research. Finally, section 4 concludes with some remarks.

2 DIFFERENT TYPES OF PRODUCTS AND LIFE CYCLE CONSIDERATION

The complex products need a systematic approach to integrate the ecological concept into the product design phase. This systematic approach requires considering technical, functional, aesthetic, and environmental data

simultaneously. For these complex products, analyzing ecoefficiency data for all modules, components, and subparts is not a simple task, and need to develop tools and techniques for data exploration (Keivanpour et al., 2018). Favi et al. (2019) developed a tool for the design of the disassembling of mechatronic products. The authors proposed improving feedbacks from tools for designers, integrating of tools into eco knowledge management systems, and using circular economy indicators for assessing the sustainability of different scenarios for EoL treatment as the research gaps in design for environment tools. Zhang et al., (2017) studied the role of big data in clean management and the manufacturing of complex products. The authors emphasized that converting the results of big data analytics into easily comprehensible forms via visualization and extracting hidden knowledge and rules from data mining for optimizing life cycle management of the complex product for the decision-making process is essential and has not been investigated by scholars. Open architecture products are a new class of products with a fixed platform and modules that will be added in later stages based on customers' preferences. These products have the potential to become a large share of the economy in Europe, North America, and large countries in Asia (Koren et al., 2013). The platforms are produced by manufacturers and many small companies will be established to produce the modules for a variety of customers' choices. For a complex product, the manufacturer is responsible for design approval and sustainability of the final product. However, the small companies and some times customers interfere in product design and they do not have access to the advanced design tools.

The role of customers is changed in the new paradigm of manufacturing. They could involve in design and contribute to the lifecycle of the products. Mass individualization provides opportunities for small companies to contribute to the design and manufacturing of the products.
This paradigm causes multiple companies and buyers involved in product design. We will have more open platform products that facilitate the integration of computers embedded systems and mechanical modules.
Koren et al. (2013) defined the open architecture product as a platform that allows the integration of different modules from different manufacturers to meeting the customer requirements. Some studies discuss how open-architecture products influence the design and manufacturing process. However, the impacts on other stages of the life cycle of the product and the EoL phase have not received much attention in the literature. Zhang et al. (2015) provided a comparison between different types of products to highlight the characteristics of the open-architecture products. The authors divided the product type into five categories: Mass-produced products, mass-customized products, reconfigurable products, upgradable products, and open-architecture products. Here, the same classification is used to clarify the EoL challenges for each product type. For mass-produced products, there is not any option at purchasing and during the use phase. The standardized nature of the products could facilitate reusing and recycling. Hence, the standard process for the EoL system could be designed. For the EoL management, the high degree of automation could be applied as there is not any change during the life cycle of the product. The eco-design could be done by the manufacturer easily. For mass customized products, there are options for customers in the purchasing stage. However, there are not any modifications in the operation phase or adding the parts or modules later after purchasing. As the options are available in the design stage, manufacturers can integrate the eco-design techniques for different options of the product. For reconfigurable and upgradable products, recycling would be more difficult as the changes and modifications would happen in the operation stage too. Though, the manufacturer can still integrate sustainability into the design stage and for the different options and modules. For open-architecture products, the modifications in the product modules could happen at the design, gate, and operation stage. Hence, considering the involvement of different manufacturers for known or unknown modules, the application of the 3R approach (reducing, reusing, and recycling) could be challenging.

Table 1: The complexities of 3R approaches application based on the product types

Types of the products	Difficulties in applying the 3R approach (L: Low, M: Medium, H: High)		
	Reducing	Reusing	Recycling
Mass-produced product	L	L	L
Mass customized product	M	L	L
Reconfigurable product	L	M	M
Upgradeable product	L	H	H
Open architecture products	H	H	H

Table 1 shows the level of complexity in applying the 3R approach for different types of products.
One challenge in reusing is the complexity of disassembling operation. Here, the complexity of disassembling operation in open-architecture products is explained.
Figure 1 shows an example of an open architecture product with two known modules and one unknown module.
Tseng et al. (2010) proposed a disassembly-oriented methodology for product module items. The first step is describing the physical structure of the product using the liaison graph. This graph is based on the parts of each module as shown in figure 1.
The key element in finding the optimized sequence of disassembling is calculating the cost of disassembling, the value from the recovered parts and materials. For the cost of disassembly, the efforts based on unfastening action or destructive action, and the complexity of the process, the time and labor costs should be considered for each module. In the case of open-architecture products, the cost should be estimated based on the known and unknown modules. For the unknown module, the complexity of unfastening action or destructive action

could be increased as the result of lack of information or lack of the effort of the manufacturer for the design for disassembling. This complexity could add the disassembling time and subsequently the cost. Usually, the genetic algorithm could be used for the decomposition of the product into basic modules. The algorithm should be adapted in the case of open-architecture products to maximize the recovered value considering the unknown modules' contact type, combination type, tool, and accessed direction.

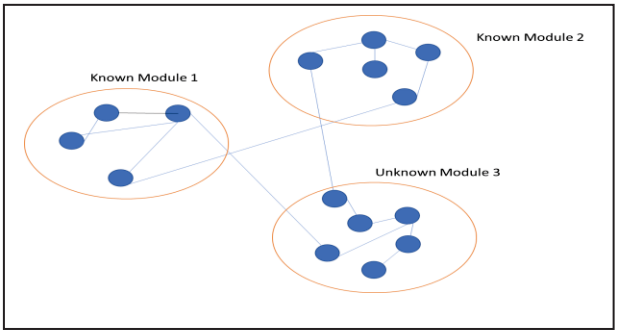


*Figure 1: Example of an open-architecture Product (*liaison graph)

3 INDUSTRY 4.0 AND IMPLICATIONS IN EOL MANAGEMENT

The implication of Industry 4.0 paradigm on the life cycle of the products is a fresh research theme. More empirical studies are required to assess the challenges and discuss the application perspectives. Extensive information should be analyzed to reduce the uncertainties in the different sub-processes of treatment. As disassembly/dismantling operations are labor-intensive tasks, real-time scheduling by providing accurate information on treatment operation resources, tools breakdowns, and any changes in the planning process are critical. Industry 4.0 and data analytics provide the required information and reduce the uncertainties in terms of the value extracted from recovered parts and material and total costs of the operation. Rahman et al. (2020) proposed "EoL 4.0" for real-time data exchange among the key players and implementing analytical capabilities of Industry 4.0 for maximizing the value from EoL products. The challenges of EoL systems in the new paradigm of Industry 4.0 is shown in figure 2.

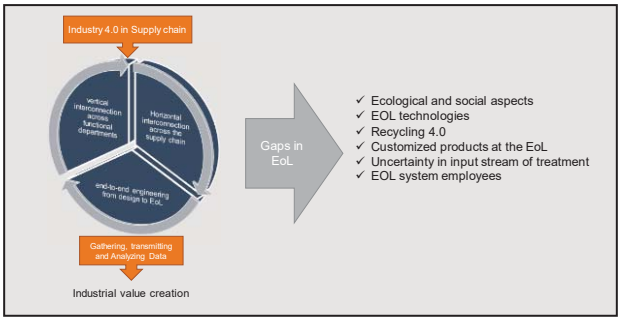


Figure 2: The challenges in the treatment of the EoL products in Industry 4.0 paradigm (source of data Rahman et al.,2020)

Rosa et al., (2020) also provided a synthesis of the literature of circular economy in the context of Industry 4.0. According to these authors, the published case studies are related to China, the US, and Europe. The topics of published papers are more focused on life cycle management, supply chain management, resource efficiency, smart services, and the adoption of the new business models. Hence, more research should be performed in other countries and focusing on topics such as Dismantling 4.0, reusing, and recycling 4.0 as well as remanufacturing 4.0. Figures 3 and 4 highlighted these gaps.
In the following sub-sections, the implications of data analytics deployment, virtual reality, and blockchain with perspectives of the application in the case of EoL aircraft treatment are discussed.



Figure 3: The publishing nations of the case studies related to implications of Industry 4.0 in the circular economy (source of data: Rosa et al.,2020)

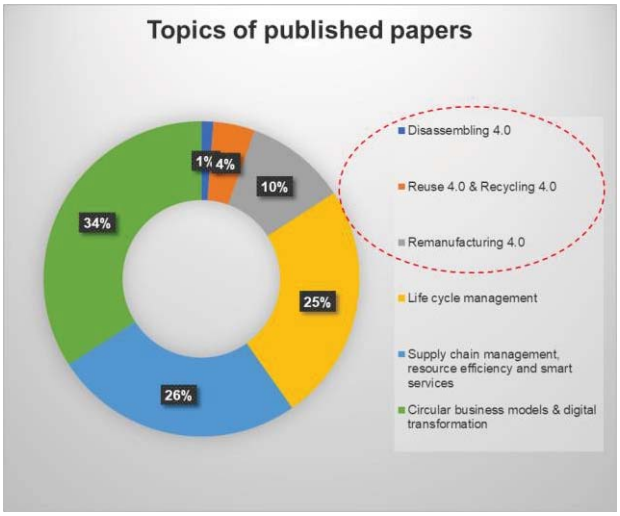


Figure 4: The gaps in the topics of the articles(Disasemblying 4.0, Reusing 4.0, recycling 4.0, and remanufacturing 4.0 are the research areas that needed more attention (Source of data: Rosa et al., 2020)

3.1 Data analytics Deployment

Keivanpour et al., (2017) developed an interactive interface for dismantling operations options, partner selections, capacity planning, collaboration choices, distribution networks, and performance trade-off to provide an expert system for the recovery of EoL aircraft. Tractability of the critical parts and materials, particularly the hazardous material, is an essential implication of RFID (Radio Frequency Identification) in the treatment process. Documentation and quality assurance of the recovered parts could be performed via database management systems and business intelligence. Simić and Dimitrijević (2010) discussed the advantages of using RFID in the context of the End of Life vehicle closed supply chain. The authors stressed the role of RFID and management information systems in data sharing for dismantling and design, life cycle data management, and product information management. Keivanpour et al. (2018) discussed the perspective of the application of big data analytics in the treatment of EoL aircraft. The secondary data from disassembling and dismantling of the horizontal stabilizer is used to illustrate the implication of knowledge management systems in the treatment process of EoL aircraft.
Poschmann et al. (2020) reviewed the studies that addressed the application of robotic in disassembling operation. The authors discussed that the application of autonomous robot cells and artificial intelligence (AI) for optimization of the disassembly sequences is the evidence of automatic robotic disassembly. Kerin and Pham (2019) mentioned two applications of Industry 4.0 in the disassembling process including simulation and models for virtual disassembly and smart robotic disassembly with real-time data application. Parsa and Saadat (2019) applied a hybrid optimization model for optimizing the disassembling sequences using multiple data fields.

EoL aircraft management is a multi-aspect operation management problem that includes several strategic, tactical, and operational decisions. Advanced data mining could improve decision making in different phases of EoL aircraft treatment. For the successful operation of re-used and remanufactured parts and components, the reliability of the components, ease of disassembling, inspection, cleaning, and maintenance data should be considered. This data should be shared via an information system between key players: manufacturer for design features, the operator for maintenance and condition monitoring, and the history of failures and dismantling or recycling agents for the treatment operation (Keivanpour et al., 2018). Databases play an important role in data analytics. Databases can aid in the integration of the data during the life cycle of the product. Now, EoL aircraft enterprises use different databases for inventory management, sales, and marketing of the recovered parts, processing manufacturer's data and maintenance records. An integrated database management system should be developed to facilitate the management of different data in all sub-processes of treatment. For example, data of material scarcity, recyclability, disassembly time, disassembly outcomes, and condition monitoring including vibration data oil analysis, loading/speed, moisture/humidity, and temperature/pressure should be analyzed. Mean-time between failures and operational performance data will be used for the estimation of the remaining useful life of the parts. The operation data including the dismantling time, labor records, the inventory of required tools and equipment are essential for close monitoring of dismantling time and finding bottlenecks in the treatment process. Moreover, this databased could be integrated with the data mining module for lean management of the EoL treatment operation. As multiple operational information systems should support the different sub-processes of treatment operation, the repository of all historical data regarding modules and components should be tracked and the continuing stream of real-time data during dismantling and disassembling phases should be assessed. Data warehouse creates the opportunity for analyzing the vast and multidimensional data. The different disassembling and dismantling strategies should be assessed based on the types of material, recyclability, replicability, and material scarcity. For data mining purposes, first, an adaptive neuro-fuzzy inference system considering a large amount of stochastic (linear and non-linear) data in the sub-processes of treatment could be used. Then, a fuzzy logic model will be applied to maximize the value recovery by analyzing the different scenarios of dismantling and recycling based on the waste hierarchy approach.

3.2 Virtual reality for integrated and sustainable recovery

EoL aircraft recycling is a new challenge in the aviation industry and few scholars addressed this subject in detail via real case studies (e.g. Sainte-Beuve, 2012; Sabaghi et al., 2015; Zahedi, 2016 and Keivanpour et al., 2017). For the EoL aircraft, access to advanced optimization tools and specialized machinery for reducing dismantling time and decreasing the waste of operation is critical. The recycling of the skeleton is not a profitable operation like removing parts and components; however, applying smart sorting solutions could increase the benefits (Sainte-Beuve, 2012). It requires the multidimensional assessment including time, difficulty, and material compatibility of the parts or modules in dissembling strategies. Hence, the use of a disassembly database including unfastening or cutting time, effort, the number of fasteners, geometrical specifications, maintenance manual, and structural repair manual, CAD (Computer-aided drafting) data, and parts database is essential (Zahedi, 2016). The digital twin provides a dynamic digital profile of a physical object and integrates 3D model, historical and real-time monitoring of the object behavior for optimizing the virtual reality. Recently, it has been received much attention in design, production, operation, and maintenance (e.g. Tao et al., 2019; Liu et al., 2019; Min et al., 2019). The application of digital twins at the

EoL is ignored in the research like the other aspects of Industry 4.0 at the EoL (Rahman et al., 2020). Few studies mentioned the perspectives of the applications for recycling and remanufacturing (e.g. Wang & Wang, 2019 and Wang et al., 2019). However, the application as the strategic tool for EoL management of complex products is not addressed in the literature. Mapping the skeleton of the aircraft based on the material zones considering the complexity of the material mix is vital for optimizing the dismantling and cutting process. The digital twin could provide a digital mapping capability enabled with multidimensional data processing, optimization, visualization, intelligent decision making for delivering the optimum dismantling solutions. The essence of the digital twin model is comparing the different dismantling and disassembling strategies with the aggregation of several dispersed databases, data analytics, and visualization dashboard. These databases include aircraft manufacturers' data, OEM data, maintenance, and operation historical data, and the second-hand parts market dataset. Data analytics aids in optimizing the disassembling sequences and smart cutting considering geometric improvement and edge preparation. For example, one scenario for dismantling is not removing rivers that are shared between components with similar materials. The analytical tool aid developing iterative models for finding reverts and comparing different strategies. More visibility regarding addressing the hazardous material and substances of concerns will be provided. The different disassembling scenarios will be simulated and visualized in an interactive decision-making dashboard for elaborating the process and giving insights. This architecture provides the flexibility of the data processing and integrates the massive data for sustainable solutions considering the uncertainties and complex nature of the EoL aircraft recycling problem.

3.3 Blockchain for tracing the recovered parts

There are some challenges in the management of the recovered parts from the EoL complex products such as aircraft. According to the International Air Transport Association (IATA), all the changes in the part movement should be tracked during the lifecycle of the products. Rajkov (2018) discussed the complexities of the aircraft supply chain due to the aircraft configuration, the multi-levels and global supply chain, the difficulties in spare part management, and the communication. Furthermore, using IoT and RFID has some challenges including energy consumption, communication, synchronization, and security. Hence, assessing the business model for the application of blockchain technology in tracing and tracking the recovered parts and providing a use case could be an interesting research area. Rajkov (2018) provided a SWOT analysis for the application of blockchain technology in the spare part management in the airline industry. Evaluating the role of the EoL initiative in an inter-organizational digital distributed network is critical.

4 DISCUSSION AND CONCLUSION

The important challenges in the circularity of utilized materials are time-tested processes of reuse, recovery, and recycling that reinforce circular economy initiatives (Tam et al., 2019). Designing closed material chains for strategic and valuable materials will be more essential than the weight percentage target of recovered material (Knieke et al., 2019). The new technologies in vehicles and lightweight constructions require novel treatment processes and strategies for EoL of complex products.
The proposed research agenda will provide an essential contribution to the field of the operationalization of sustainable development by developing innovative tools and decision support systems considering the impacts of new business trends and cyber-physical technologies on the circular economy. The management of the complex products in the circular economy is a dynamics and transdisciplinarity research agenda and it facilitates and expedites knowledge diffusion among researchers, practitioners, and policymakers. Moreover, it includes opportunities for extensive training high-quality personnel, and engineers in the field.

References

Favi, C., Marconi, M., Germani, M., & Mandolini, M. (2019). A design for disassembly tool oriented to mechatronic product de-manufacturing and recycling. Advanced Engineering Informatics, 39, 62-79.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy–A new sustainability paradigm?. Journal of cleaner production, 143, 757-768.

Keivanpour, S., & Ait Kadi, D. (2018). Strategic eco-design map of the complex products: toward visualisation of the design for environment. International Journal of Production Research, 56(24), 7296-7312.

Keivanpour, S., & Kadi, D. A. (2018). Perspectives for application of the internet of things and big data analytics on end of life aircraft treatment. International Journal of Sustainable Aviation, 4(3-4), 202-220.

Keivanpour, S., Ait Kadi, D., & Mascle, C. (2017). End-of-life aircraft treatment in the context of sustainable development, lean management, and global business. International Journal of Sustainable Transportation, 11(5), 357-380.

Kerin, M., & Pham, D. T. (2019). A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing. Journal of Cleaner Production, 117805.

Knieke, C., Lawrenz, S., Fröhling, M., Goldmann, D., & Rausch, A. (2019). Predictive and flexible Circular Economy approaches for highly integrated products and their materials as given in E-

Mobility and ICT. In Materials Science Forum (Vol. 959, pp. 22-31). Trans Tech Publications Ltd

Koren, Y., Hu, S. J., Gu, P., & Shpitalni, M. (2013). Open-architecture products. CIRP Annals, 62(2), 719-729.

Liu, Q., Zhang, H., Leng, J., & Chen, X. (2019). Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. International Journal of Production Research, 57(12), 3903-3919.

Min, Q., Lu, Y., Liu, Z., Su, C., & Wang, B. (2019). Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry. International Journal of Information Management.

Parsa, S., & Saadat, M. (2019). Intelligent selective disassembly planning based on disassemblability characteristics of product components. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104(5-8), 1769-1783.

Poschmann, H., Brüggemann, H., & Goldmann, D. (2020). Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation. Chemie Ingenieur Technik, 92(4), 341-359.

Rahman, S. M., Perry, N., Müller, J. M., Kim, J., & Laratte, B. (2020). End-of-Life in industry 4.0: Ignored as before?. Resources, Conservation and Recycling, 154, 104539.

Rajkov, D. (2018). Blockchain for aircraft spare part management: Evaluating the robustness of the Maintenance, Repair and Overhaul business model.

Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. International Journal of Production Research, 58(6), 1662-1687.

Sabaghi, M., Cai, Y., Mascle, C. and Baptiste, P. (2015) 'Sustainability assessment of dismantling strategies for end-of-life aircraft recycling', Resources, Conservation and Recycling, September, Vol. 102, pp.163–169.

Sainte-Beuve, D. (2012) Évaluation de Différentes Stratégies de Démantèlement de la Carcasse D'un Avion, Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal.

Tam, E., Soulliere, K., & Sawyer-Beaulieu, S. (2019). Managing complex products to support the circular economy. Resources, Conservation and Recycling, 145, 124-125.

Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., ... & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin-driven product design framework. International Journal of Production Research, 57(12), 3935-3953.

Tseng, H. E., Chang, C. C., & Cheng, C. J. (2010). Disassembly-oriented assessment methodology for product modularity. International Journal of Production Research, 48(14), 4297-4320.

Wang, X. V., & Wang, L. (2019). Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0. International Journal of Production Research, 57(12), 3892-3902.

Wang, Y., Wang, S., Yang, B., Zhu, L., & Liu, F. (2019). Big data driven Hierarchical Digital Twin Predictive Remanufacturing paradigm: Architecture, control mechanism, application scenario and benefits. Journal of Cleaner Production, 119299.

Zahedi, H. (2016) End-of-Life Efficient Disassembly of Complex Structures Using Product and process Focused Approach, Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal.

Zhang, J., Xue, D., & Gu, P. (2015). Adaptable design of open architecture products with robust performance. Journal of Engineering Design, 26(1-3), 1-23.

Zhang, Y., Ren, S., Liu, Y., & Si, S. (2017). A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. Journal of Cleaner Production, 142, 626-641.

MODELISATION ET SIMULATION D'UN MODULE D'AJUSTEMENT DE LA CAPACITE D'UN SYSTEME DDMRP

G. DESSEVRE, M. BEN ALI

Laboratoire Poly-DDMRP,
Département de Mathématiques et de Génie Industriel, Polytechnique Montréal
Montréal, Canada
guillaume.dessevre@polymtl.ca, maha.ben-ali@polymtl.ca

RESUME : *La gestion de la production est de plus en plus complexe dans le contexte industriel actuel, volatile et incertain. Les approches à flux poussé et à flux tiré atteignant leurs limites, les auteurs du livre «* Demand Driven Material Requirements Planning *DDMRP »,* Ptak et Smith (2011), *proposent une nouvelle approche de gestion de production. Basée sur un système de recomplètement de stock, cette approche fonctionne toutefois à capacité infinie. Nous proposons dans cet article de modéliser et simuler un module de calcul de charge permettant d'ajuster la capacité d'un atelier piloté en DDMRP. On cherche ainsi à obtenir un taux de charge autour des 80% en tout temps pour éviter de saturer l'atelier. Ce dernier est soumis à une demande incertaine caractérisée par des pics de commandes. Le module assure un taux de service satisfaisant face à différents scénarios de demande et permet d'évaluer les limites de charge de l'atelier.*

MOTS-CLES : *Gestion de la production, Ajustement de la capacité, DDMRP, Simulation des systèmes*

1 INTRODUCTION

Le *Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP)* a été créé par Ptak et Smith (2011) dans le but de proposer une méthode mixte entre flux poussé et flux tiré. Aujourd'hui, cette méthode attire l'attention, autant dans le monde industriel où de plus en plus d'entreprises la déploient avec succès, que dans le monde académique qui cherche à mieux comprendre, analyser et challenger la méthode dans différents contextes (Bahu, Bironneau, & Hovelaque, 2019).

Le DDMRP se base principalement sur une logique de recomplètement de stocks : des *buffers* sont positionnés sur la nomenclature des produits et lorsque le seuil projeté de ces *buffers* atteint un certain niveau, un ordre d'approvisionnement (ou de production) est émis. Dans cette logique, la plupart des études sur le DDMRP considère des systèmes de production à capacité infinie.
Cette mécanique de projection du seuil considère les pics de demande pour anticiper et lisser la charge dans le temps. Toutefois, la prise en compte des pics peut surcharger l'atelier et dépasser la capacité prévue à court terme, entraînant ainsi une saturation de l'atelier et une baisse du taux de service.

Or, plusieurs leviers d'ajustement de la capacité peuvent être mobilisés afin de balancer la charge et la capacité. Ces décisions sont gérées conventionnellement une fois par mois par le *Demand Driven Sales & Operations Planning* (DDS&OP) de Ptak et Smith (2016). Les auteurs proposent par exemple d'ajuster la taille des *buffers* pour lisser la charge. Un ajustement plus fréquent de la capacité, sur du court terme opérationnel, pourrait être envisagé afin d'améliorer la performance du système de production.

Dans cet article, nous proposons de modéliser et de simuler un module d'ajustement de la capacité de production d'un atelier géré en DDMRP où les opérateurs sont la ressource goulot. Le module effectue un calcul hebdomadaire de la charge à court terme en considérant des pics de demande, et estime le nombre d'opérateurs nécessaire pour la satisfaire sans saturer l'atelier.

La structure de l'article est comme suit : la section 2 présente une brève revue de littérature sur le DDMRP et sur l'ajustement de la capacité ; la section 3 décrit le cas d'étude et le plan d'expérience ; les résultats de la simulation sont présentés et analysés dans la section 4 ; pour finir sur la conclusion et les perspectives en section 5.

2 REVUE DE LITTERATURE ET CONTRIBUTION DE L'ARTICLE

Dans cette section, la littérature autour du DDMRP, ainsi que les éléments de paramétrage importants pour la compréhension de l'article sont présentés, suivis par une brève littérature sur l'ajustement de la capacité, pour finir avec la contribution de l'article.

2.1 Littérature autour du DDMRP

Après sa première apparition dans la troisième édition du *Orlicky's Material Requirements Planning* de Ptak et Smith (2011), où les auteurs exposent les limites des méthodes traditionnelles et introduisent leur nouvelle approche, de nombreux chercheurs se sont intéressés au

potentiel de la méthode DDMRP. Initialement, les publications ont porté sur la comparaison du DDMRP aux méthodes traditionnelles (MRP2 et Kanban) pour légitimer sa pertinence (Ihme & Stratton, 2015; Miclo, R, Fontanili, Lauras, Lamothe, & Milian, 2016; Miclo, Romain, Lauras, Fontanili, Lamothe, & Melnyk, 2018; Shofa & Widyarto, 2017). Récemment, les publications se sont tournées plus vers les différentes parties du DDMRP : Martin, Baptiste, Lamothe, Miclo et Lauras (2018) s'intéressent au paramétrage des *buffers* et proposent un arbre de décision pour mieux les piloter, Lee et Rim (2019) présentent une méthode différente de calcul du stock de sécurité des *buffers*, (Dessevre, Martin, Baptiste, Lamothe, & Lauras, 2019) et (Dessevre, Martin, Baptiste, Lamothe, Pellerin, et al., 2019) s'intéressent au contrôle des temps de défilement et du paramètre Facteur de délai. Une étude plus récente de Vidal, Lauras, Lamothe et Miclo (2020) porte attention au niveau stratégique avec le concept de l'*Adaptive Sales & Operations Planning*. Notons que de nombreuses publications (Dessevre, Martin, Baptiste, Lamothe, Pellerin, et al., 2019; Ihme & Stratton, 2015; Miclo, R et al., 2016; Shofa & Widyarto, 2017) ont utilisé la simulation comme outil d'étude. Ptak et Smith (2016) continuent d'intégrer de nouveaux éléments à la méthode avec l'apparition d'une œuvre plus complète, et récemment l'intégration du *Demand Driven Adaptive Enterprise* dans l'œuvre de Ptak et Smith (2018).

2.2 Éléments de paramétrage du DDMRP

Selon Ptak et Smith (2016), la génération d'ordres d'approvisionnement se base sur l'équation du flux déterminée par la formule suivante :

Équation du flux net (EFN) = Stock en main + Stock en cours de production – demande qualifiée (1)

où la demande qualifiée correspond à la somme de la demande du jour, des pics de demande détectés à court-terme, ainsi que la demande en retard.

Pour qu'une demande journalière soit considérée comme un pic, il faut que celle-ci soit dans un horizon donné et que l'amplitude du pic dépasse un seuil bien défini. La figure 1 illustre un exemple où le seuil (en tirets) est fixé à 100 pièces et l'horizon (en pointillés) à 6 jours : la demande qualifiée correspond à la somme de la demande du jour 1 et du pic détecté au jour 5, soit 50 + 120 = 170 pièces.

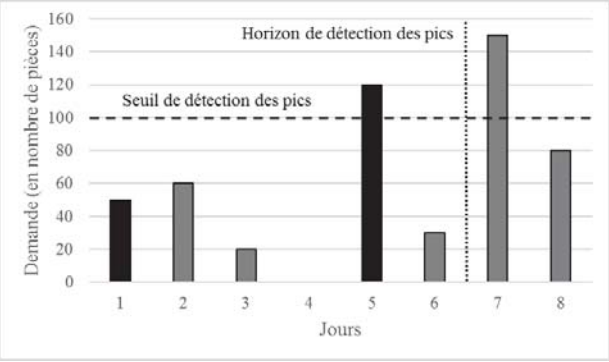


Figure 1 : Exemple de calcul de la demande qualifiée

Si l'EFN est au-dessous du Top du Jaune du *buffer*, un ordre de recomplètement jusqu'au Top du Vert est émis (voir Ptak et Smith (2016) pour plus de détails sur les formules de dimensionnement des buffers). Cependant, il n'est pas clair, en pratique comme en théorie, comment exploiter la flexibilité capacitaire d'un atelier afin d'absorber les pics de demande, tout en gardant un niveau de charge raisonnable.

2.3 Ajustement de la capacité dans la littérature

La littérature sur les problèmes capacitaires à court et à moyen termes cherche à équilibrer la demande prévisionnelle et la capacité disponible (Vollman, Berry, & Whybark, 1992). Il existe plusieurs approches pour ajuster la charge et la capacité telles que la production anticipée sur des périodes de sous-activité, entraînant un stockage temporaire, ou encore l'utilisation des capacités résiduelles postérieures en différant la satisfaction de la demande (Graves, 1999; Vollmann, 2005). Des revues exhaustives sur le sujet sont présentées par (Beach, Muhlemann, Price, Paterson, & Sharp, 2000) et (De Toni & Tonchia, 1998).

La flexibilité capacitaire des ateliers est un atout majeur pour contrer les erreurs de prévisions. Bish, Muriel et Biller (2005) exposent certains avantages, comme l'amélioration des ventes, et mettent en garde contre les effets dus aux oscillations en production et en approvisionnement. Ou et Feng (2019) présentent un algorithme d'ajustement capacitaire considérant les coûts de production et les coûts d'ajustement de la capacité. Hu, Guan, Han et Wen (2017) proposent un modèle mathématique pour résoudre des problèmes d'ajustement capacitaire où les machines peuvent être réglées différemment en fonction de la production souhaité.

Du côté du DDMRP, les ajustements capacitaires sont gérés principalement par le DDS&OP. Il s'agit d'un niveau de prise de décision faisant le pont entre le niveau stratégique et le niveau opérationnel, visant à harmoniser la demande (portfolio et nouvelles activités) et la capacité en se basant sur des indicateurs de performance clés (Ptak & Smith, 2016). A titre d'exemple, les auteurs proposent d'ajuster le dimensionnement des *buffers* en utilisant un Facteur d'ajustement planifié pour lisser la charge. Cela dit, les ajustements capacitaires du DDS&OP semblent convenir pour une vision à moyen terme, et non pour un point de vue opérationnel à court terme comme nous le proposons dans cet article.

2.4 Contribution de l'article

Le DDMRP est de plus en plus sous le feu des projecteurs des chercheurs et la méthode se déploie dans l'industrie. Cependant, aucune étude ne s'est penchée sur les problèmes liés à l'intégration de pics de demande, notamment pour balancer la charge et la capacité à court terme dans un atelier en exploitant la flexibilité capacitaire. Nous proposons dans cet article de modéliser un

module d'ajustement de la capacité d'un atelier piloté en DDMRP et de simuler sa performance face à une demande incertaine caractérisée par des pics de commandes.

3 METHODOLOGIE

Dans cette section, nous introduisons le cas d'étude, soit les paramètres de l'atelier de production, ainsi que la demande à laquelle il fait face. Ensuite, nous présentons le module d'ajustement de la capacité proposé et le plan d'expérience.

3.1 Paramètres de l'atelier

Nous considérons un atelier composé d'une ligne de production de 6 machines en série. La ligne produit 30 articles ayant des temps de production et des temps de changement de série différents. Plusieurs sources de variabilité ont été incorporées au système, principalement reliées à la demande et aux opérations de production : les temps de production et de changement de série suivent des lois triangulaires à ±20% autour de la moyenne, et la première machine et la cinquième machine de la ligne sont sujettes à des pannes représentant respectivement 10% et 15% du temps d'ouverture (les temps de pannes et les temps entre les pannes suivent des lois exponentielles). Les *Decoupled Lead Time*, Facteur de délai et Facteur de variabilité sont tous égaux et valent respectivement 5 jours (40 heures), 50% et 50%.

La production de chaque article est pilotée par un *buffer* de stock DDMRP. Les *buffers* sont vérifiés tous les jours en même temps, et ceux dont l'EFN est inférieure au Top du Jaune lancent un ordre de fabrication pour recompléter le *buffer* jusqu'au Top du Vert. Les ordres sont ordonnancés selon la priorité basique du DDMRP : le produit dont le ratio entre l'EFN et le Top du Jaune est le plus faible est prioritaire (Ptak & Smith, 2016). Pour le reste, les ordres sont traités en premier-arrivé premier-servi. Le seuil de détection de pics est fixé à la moitié de la Zone Rouge pour tous les produits, et l'horizon de détection des pics est fixé à 3 semaines.

Nous faisons l'hypothèse que les matières premières sont disponibles en tout temps et qu'un opérateur doit être présent durant toutes les opérations (changement de série et production), pour qu'un article soit produit sur une machine. Afin de justifier le besoin d'ajuster périodiquement la capacité de l'atelier, ce dernier est paramétré de façon à ce que les opérateurs soient des ressources goulots. L'atelier fonctionne 8 heures par jour, 5 jours par semaine et gère les commandes partielles. Nous avons choisi ce type d'atelier car il semble correspondre à ce que l'on pourrait trouver dans l'industrie entre deux *buffers* gérés en DDMRP.

Nous supposons que chaque produit possède un signal de demande distinct, tel que détaillé dans la sous-section suivante.

3.2 Génération de la demande

L'atelier fait face à trois profils différents de demande pour les 30 produits fabriqués. Une demande est caractérisée par deux paramètres : la taille moyenne de la commande (en quantité de pièces) et le temps moyen entre deux commandes (en jours). Ces paramètres sont explicités ci-dessous.

Pour les 30 produits, les tailles de commandes sont uniformément dispersées à ±20% autour de la taille de commande moyenne associée à chaque produit. Les temps inter-arrivés des commandes d'un produit sont exponentiellement distribués autour d'une espérance de 2 jours. Lorsqu'une commande arrive, l'expédition doit se faire dans les 5 à 10 prochains jours (suivant une loi uniforme), permettant d'avoir une visibilité d'une semaine sur les expéditions à réaliser.

La demande des produits 1 à 5 est relativement stable, sujette à des pics de commandes. Les temps entre les commandes représentant des pics sont également exponentiellement distribués autour d'une d'espérance de 5 ou de 20 jours (voir plus loin le tableau 1). Les pics de commandes sont détectés trois semaines à l'avance. En résumé, pour les produits 1 à 5, on reçoit en moyenne une commande tous les deux jours pour chaque produit, ainsi qu'un pic de commande tous les 5 ou 20 jours.

La demande des produits 6 à 15 est à la base stable. Nous proposons de rajouter un effet de saisonnalité dans certains scénarios : les signaux de demande des produits 6 à 15 (à la base stables) sont remplacés par des signaux en échelons de 25 semaines. La demande de la haute saison est considérée comme le double de celle de la basse saison.

La demande des produits 16 à 30 quant à eux est stable en tout temps. La Figure 2 représente les signaux de demande pour un produit de chaque profil de demande : le produit 5 (courbe noire, avec des pics), le produit 10 (courbe en pointillée, en échelons) et le produit 20 (courbe en tiret, stable en tout temps).

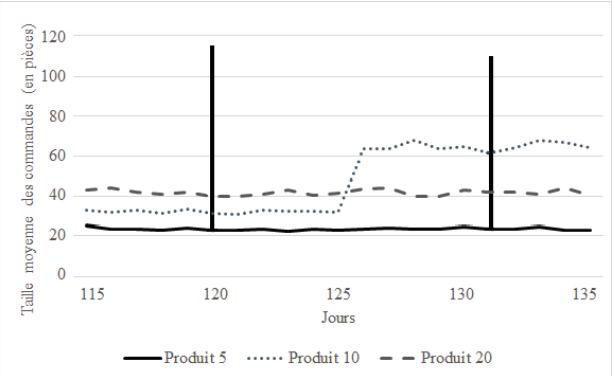


Figure 2 : Signaux de demande des produits 5, 10 et 20 entre les jours 115 et 135

3.3 Module d'ajustement de la capacité

Le module d'ajustement a pour but de calculer la charge de travail à court terme et d'estimer la capacité requise, soit le nombre d'opérateurs nécessaire pour éviter de saturer l'atelier en fluidifiant la charge.

Le calcul se fait en fin de chaque semaine (le vendredi soir) dans le but de déterminer le nombre d'opérateurs nécessaire pour la semaine qui suit (à partir du lundi matin). Le nombre d'opérateurs demeure le même tout le long de la semaine.
Le module suit les étapes suivantes :

1) Estimation du nombre de pièces à produire dans les prochains jours : il s'agit de prendre en compte les commandes de la semaine à venir en faisant l'hypothèse qu'elles vont déclencher un ordre de fabrication ;

2) Prise en compte des pics de la troisième semaine : Puisque les pics vont entrer dans l'horizon de détection à partir de la troisième semaine, ils vont être considérés dans l'EFN et seront ainsi produits dès le lundi par anticipation. Ils doivent donc être ajoutés aux nombres de pièces à produire ;

3) Calcul de la charge à venir : il s'agit de multiplier le nombre de pièces à produire par les temps de production et d'ajouter les temps de changement de série afin d'obtenir le temps de production requis ;

4) Estimation du nombre d'opérateurs nécessaire pour la semaine à venir : on se fixe un taux de charge cible de 80% pour les opérateurs, ce qui correspond au ratio du temps de production requis sur le temps total disponible. Le temps de production requis étant calculé à l'étape 3, le module estime dans cette étape le temps total disponible, c'est-à-dire le nombre d'opérateurs multiplié par les 40 heures d'ouverture par semaine de l'atelier.

Par exemple, si le temps de production requis pour la semaine qui suit est estimé à 140 heures (charge calculée à l'étape 3), le temps total disponible doit être 140 / 0.8 = 175 heures pour obtenir un taux de charge de 80%. Sachant qu'un opérateur ne peut travailler qu'au maximum 40 heures par semaine, il faut 175 / 40 = 4.375 opérateurs. Le module arrondit toujours à l'unité supérieure, dans cet exemple il estimera alors qu'il faut 5 opérateurs pour la semaine qui suit.

Le module d'ajustement permet donc de calculer et de décider du nombre d'opérateurs nécessaire pour la semaine à venir. Cela dit, il ne peut y avoir au maximum que 6 opérateurs puisque l'atelier se compose de 6 machines.

Si le module calcule qu'il faut plus que 6 opérateurs, l'atelier risque d'être saturé et d'autres solutions de compensation doivent être envisagées (par exemple, réduire les temps de changement de série ou sous-traiter une partie de la production).

La figure 3 reprend les étapes principales du modèle simulé (génération de la demande, des ordres de fabrication, production et module d'ajustement capacitaire).

Dans ce qui suit, les expériences dans lesquelles le module a été simulé sont décrites.

3.4 Plan d'expériences

Le but de la simulation est d'analyser la performance du système de production avec et sans l'ajustement de la capacité de production.

Deux indicateurs de performance sont considérés : le taux de service client (soit le pourcentage de commandes satisfaites par rapport au nombre total de commandes reçues) et le taux de charge des opérateurs afin de

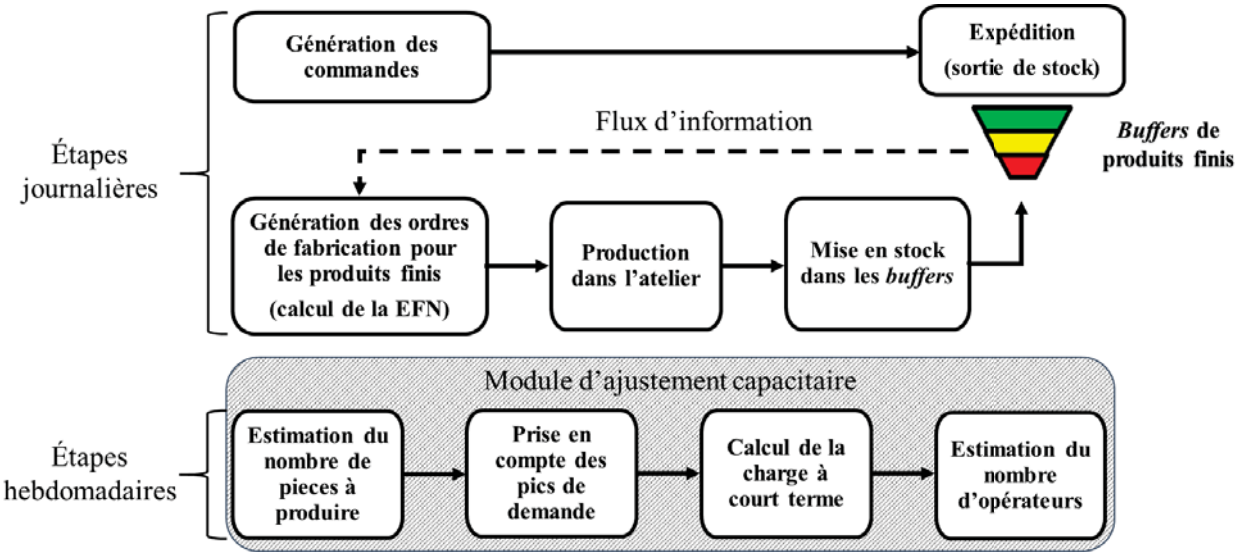


Figure 3 : Schéma des principales étapes du modèle simulé

refléter d'une part le niveau de satisfaction de la demande, et d'autre part le niveau de saturation de l'atelier. Une commande est dite satisfaite lorsque le stock du produit est disponible en quantité suffisante le jour où il doit être expédié vers le client. Sinon la commande est insatisfaite et entre dans une file, attendant que le stock soit de nouveau disponible.

Le plan d'expérience est exécuté sous deux étapes :

- Étape 1 : simuler différentes amplitudes de pics de commandes pour démontrer l'efficacité du module et identifier trois niveaux différents d'amplitude (importante, moyenne et faible) requis pour les expériences de l'étape 2 ;
- Étape 2 : simuler différents signaux de demande dans le but de challenger davantage le module.

Dans l'étape 1, nous comparons la performance de l'atelier avec et sans le module d'ajustement des opérateurs. Une première simulation a été réalisée pour estimer le nombre d'opérateurs nécessaire pour faire tourner l'atelier dans des conditions de base (scénario de base sans les pics et sans la possibilité de faire l'ajustement). Cette étude préliminaire a déterminé qu'en moyenne 3.75 opérateurs sont actifs dans l'atelier. Nous considérerons donc 4 opérateurs disponibles en tout temps pour l'atelier sans module d'ajustement de la capacité.

L'amplitude moyenne des pics de commande associé à un produit donné correspond à un multiple de la consommation journalière moyenne (« *Average Daily Usage* » ADU) de ce produit. Pour cette première étape, nous considérons un multiple variant de 0 (aucun pic) à 20 (les amplitudes des pics sont égales à 20 fois l'ADU).

Dans l'étape 2, le plan d'expérience de la deuxième étape considère 24 scénarios qui se distinguent par quatre critères :

- la possibilité d'ajustement de la capacité (modèle de simulation avec ou sans le module d'ajustement de la capacité) ;
- la fréquence des pics de commandes modélisée par l'espérance des temps entre les pics de commandes est de 5 ou 20 jours ;
- la demande des produits 6 à 15 : stable ou saisonnière (en échelon) ; et
- l'amplitude des pics de demande pour les produits 1 à 5 : importante (I), moyenne (M) et faible (F). Ces trois niveaux sont identifiés à l'étape 1.

La simulation est faite sur un horizon de 110 semaines, dont une mise en régime permanent de 10 semaines. Un total de 105 expériences sont réalisées (81 dans l'étape 1 et 24 dans l'étape 2), considérant 100 réplications pour chaque expérience. La version 15.10 du logiciel Arena est utilisée avec Windows 7.

Scénario	Amplitude des pics	Demande Produits 6 à 15	Esp. des temps entre pics	Ajustement de la capacité
1	I	En échelon	20	Oui
2	I	En échelon	20	Non
3	I	En échelon	5	Oui
4	I	En échelon	5	Non
5	I	Stable	20	Oui
6	I	Stable	20	Non
7	I	Stable	5	Oui
8	I	Stable	5	Non
9	M	En échelon	20	Oui
10	M	En échelon	20	Non
11	M	En échelon	5	Oui
12	M	En échelon	5	Non
13	M	Stable	20	Oui
14	M	Stable	20	Non
15	M	Stable	5	Oui
16	M	Stable	5	Non
17	F	Échelon	20	Oui
18	F	Échelon	20	Non
19	F	Échelon	5	Oui
20	F	Échelon	5	Non
21	F	Stable	20	Oui
22	F	Stable	20	Non
23	F	Stable	5	Oui
24	F	Stable	5	Non

Tableau 1 : Plan d'expérience de l'étape 2

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Illustration du mode de fonctionnement du module

La figure 4 permet de mieux comprendre le mode de fonctionnement du module d'ajustement de la capacité au cours du temps.

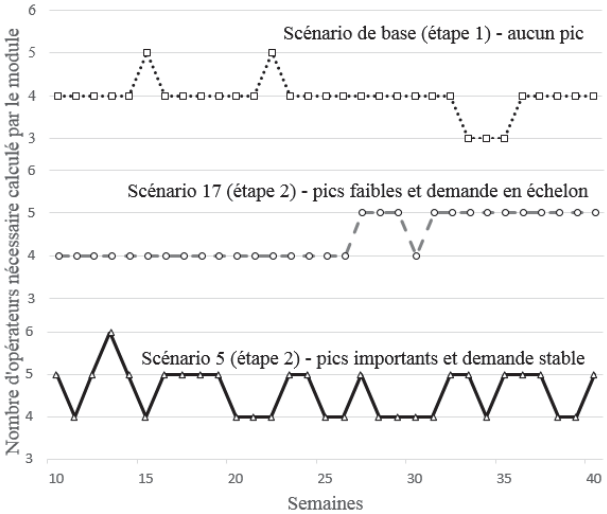


Figure 4 : Nombre d'opérateurs calculé par le module au cours du temps (semaines 10 à 40)

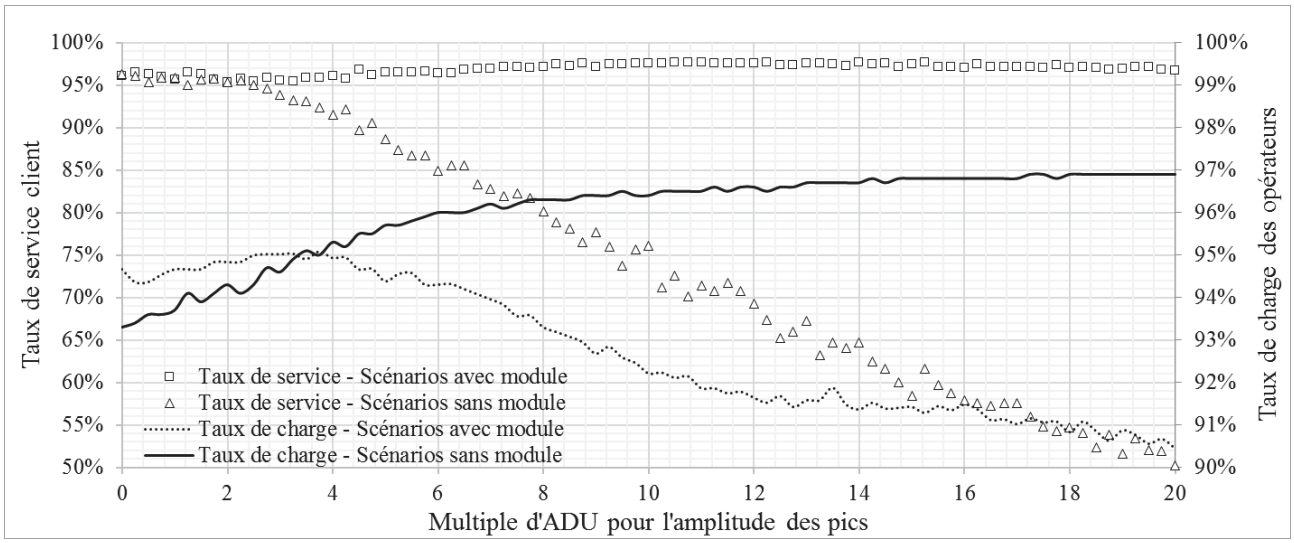


Figure 5 : Taux de service et taux de charge des opérateurs en fonction de l'amplitude des pics de commande, avec et sans module d'ajustement des opérateurs

Il s'agit des résultats de calcul du nombre d'opérateurs entre les semaines 10 et 40 pour les scénarios suivants :

- Le scénario de base (étape 1), où aucun pic n'est considéré et en moyenne 4 opérateurs suffisent à balancer la charge ;
- Le scénario 17 (étape 2), où l'amplitude des pics est faible et la demande en échelon des produits 6 à 15 pousse le module à estimer qu'il faut 5 opérateurs au lieu de 4 à partir de la semaine 25 ; et
- Le scénario 5 (étape 2), où l'amplitude des pics est importante et fait osciller le nombre d'opérateurs entre 4 et 5 (jusqu'à 6 parfois).

4.2 Étape 1 – Effet de l'amplitudes des pics

Cette étape vise à démontrer l'apport du module d'ajustement de la capacité en présence de pics de commande et à identifier trois niveaux d'amplitudes des pics requis pour les expériences de l'étape 2.

La figure 5 présente les résultats de l'étape 1 :

- En abscisse : le multiplicateur d'ADU caractérisant l'amplitude des pics de commande ;

- En ordonné à gauche : le taux de service client, représenté par les marques carrées avec le module et triangulaires sans le module ;

- En ordonné à droite : le taux de charge des opérateurs, représenté par la courbe en pointillé avec le module et pleine sans le module.

Les résultats démontrent que plus l'amplitude des pics est importante, plus le taux de service diminue sans le module d'ajustement (jusqu'à 50% pour des pics correspondant à 20 fois la demande moyenne). L'atelier peut supporter des pics assez petits, puis il commence à saturer. Avec le module d'ajustement, le nombre d'opérateurs s'adapte à la charge de l'atelier et le taux de service est maintenu autour des 98%.

À partir des deux courbes du taux de service, nous identifions trois niveaux d'amplitude des pics : une amplitude importante de 20 ADU, une amplitude moyenne de 10 ADU (correspondant à un taux de service qui descend au-delà de 95%) et une amplitude faible de 2,5 ADU (le seuil au-delà duquel le système sans le module performe moins qu'avec le module).

4.3 Étape 2 – Effet des signaux de la demande

Les résultats des 24 scénarios de l'étape 2 sont illustrés dans la figure 6 page suivante, avec à gauche le taux de service et à droite le taux de charge. Les barres grises et noires représentent respectivement les résultats sans et avec le module d'ajustement de la capacité.

Sans ajustement de la capacité, le taux de charge varie entre 94% et 99% et le taux de service est en moyenne autour des 60%. Avec l'ajustement de la capacité, le taux de charge varie au-delà de 77 %, et le taux de service sont au-dessus des 90%, excepté pour les scénarios 3, 4, 7 et 8. En effet, le taux de service est de 50% avec le module d'ajustement, comparé à 30% sans le module. Il s'agit des « pires » scénarios (taux de charge de 99 %) où des pics d'amplitude importante (20 fois l'ADU) surgissent toutes les semaines et les produits 5 à 15 subissent une saisonnalité augmentant la charge de l'atelier en haute saison. Le module d'ajustement de la capacité atteint ses limites dans ces quatre scénarios : il ne peut plus balancer la charge et la capacité (6 opérateurs ne suffisent plus) et arrive à satisfaire juste 50% de la demande.

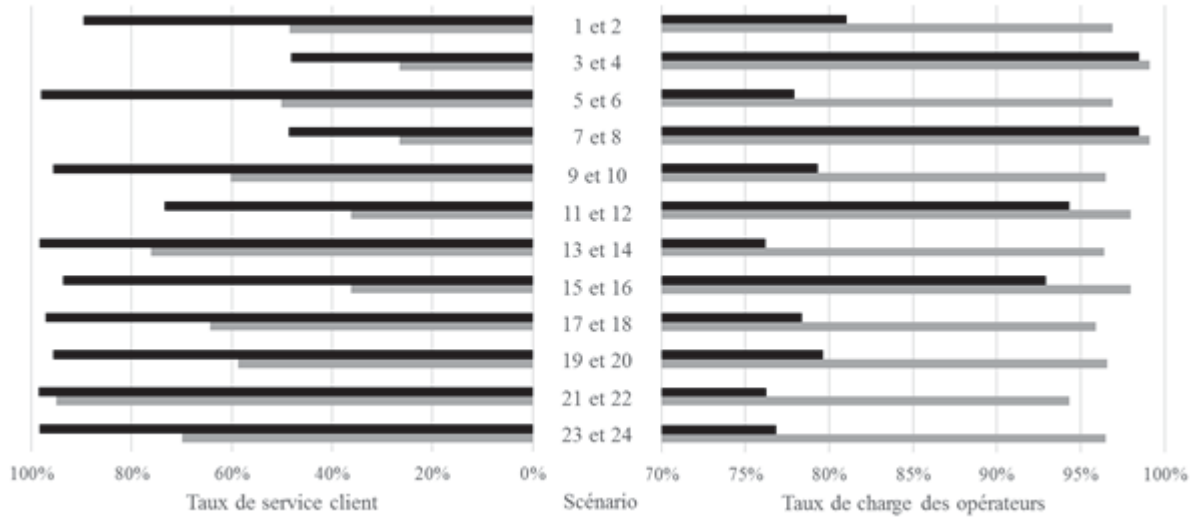


Figure 6 : Taux de service et taux de charge des opérateurs pour chaque scénario sans (barres grises) et avec (barres noires) ajustement de la capacité

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous modélisons et simulons un module d'ajustement de la capacité d'un atelier géré en DDMRP. Ce module permet de considérer des pics de demande et d'harmoniser la charge et la capacité à court terme face à différents scénarios de demande.

Les résultats de la simulation démontrent la capacité de ce module à assurer un taux de service satisfaisant dans la plupart des scénarios, tout en permettant de réduire le nombre d'opérateurs s'ils ne sont pas nécessaires.

Pour aller plus loin, il serait possible désormais de comparer et/ou combiner ce module d'ajustement de capacité avec d'autres mécaniques, dont celles intrinsèques à la méthode DDMRP, soit le dimensionnement des zones des *buffers*, utiliser le Facteur d'ajustement planifié, l'utilisation des *buffers* de capacité, etc.
Des comparaisons peuvent être faites avec les solutions conventionnelles d'ajustement de la capacité comme le recours aux heures supplémentaires, à des équipes supplémentaires de travail, à la sous-traitance capacitaire, etc. Les coûts du changement fréquent du nombre d'employés, ainsi que les contraintes syndicales pourraient également être incorporés.

Enfin, il serait intéressant d'étudier d'autres types d'atelier/de systèmes ainsi que différentes formes de demande pour élargir les conclusions de cette étude.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient M. Slim Mahmoudi pour son support technique.

REFERENCES

Bahu, B., Bironneau, L., & Hovelaque, V. (2019). Compréhension du DDMRP et de son adoption: premiers éléments empiriques. *Logistique & Management, 27*(1), 20-32.

Beach, R., Muhlemann, A. P., Price, D. H., Paterson, A., & Sharp, J. A. (2000). A review of manufacturing flexibility. *European journal of operational research, 122*(1), 41-57.

Bish, E. K., Muriel, A., & Biller, S. (2005). Managing flexible capacity in a make-to-order environment. *Management Science, 51*(2), 167-180.

De Toni, A., & Tonchia, S. (1998). Manufacturing flexibility: a literature review. *International journal of production research, 36*(6), 1587-1617.

Dessevre, G., Martin, G., Baptiste, P., Lamothe, J., & Lauras, M. (2019). *Étude d'impact du paramétrage des temps de défilement sur la performance d'un déploiement de la méthode DDMRP*. Communication présentée à CIGI QUALITA 2019-13eme Conférence Internationale CIGI QUALITA, Montréal, Canada.

Dessevre, G., Martin, G., Baptiste, P., Lamothe, J., Pellerin, R., & Lauras, M. (2019). *Decoupled Lead Time in finite capacity flowshop: a feedback loop approach.* Communication présentée à IESM 19-8th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Shanghai, China (p. p. 142-148).

Graves, S. C. (1999). Manufacturing planning and control. *Massachusetts institute of technology*, 1-26.

Hu, Y., Guan, Y., Han, J., & Wen, J. (2017). Joint optimization of production planning and capacity adjustment for assembly system. *Procedia CIRP, 62*, 193-198.

Ihme, M., & Stratton, R. (2015). *Evaluating demand driven MRP: a case based simulated study*. Communication présentée à International Conference of the European Operations Management Association, Neuchatel, Switzerland.

Lee, C.-J., & Rim, S.-C. (2019). A Mathematical Safety Stock Model for DDMRP Inventory Replenishment. *Mathematical Problems in Engineering, 2019*.

Martin, G., Baptiste, P., Lamothe, J., Miclo, R., & Lauras, M. (2018). *A process map for the demand driven adaptive enterprise model: Towards an explicit cartography*. Communication présentée à 7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS 2018, July 8, 2018 - July 11, 2018, Lyon, France (p. 664-672).

Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., & Milian, B. (2016). An empirical comparison of MRPII and Demand-Driven MRP. *IFAC-PapersOnLine, 49*(12), 1725-1730.

Miclo, R., Lauras, M., Fontanili, F., Lamothe, J., & Melnyk, S. A. (2018). Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management. *International Journal of Production Research*, 1-16.

Ou, J., & Feng, J. (2019). Production lot-sizing with dynamic capacity adjustment. *European Journal of Operational Research, 272*(1), 261-269.

Ptak, C., & Smith, C. (2011). *Orlicky's Material Requirements Planning 3/E*: McGraw Hill Professional.

Ptak, C., & Smith, C. (2016). *Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP)*: Industrial Press, Incorporated.

Ptak, C., & Smith, C. (2018). *The Demand Driven Adaptive Enterprise*: Industrial Press, Incorporated.

Shofa, M. J., & Widyarto, W. O. (2017). *Effective production control in an automotive industry: MRP vs. demand-driven MRP*. Communication présentée à AIP Conference Proceedings (vol. 1855, p. 020004).

Vidal, J., Lauras, M., Lamothe, J., & Miclo, R. (2020). *Toward an Aggregate Approach for Supporting Adaptive Sales And Operations Planning*. Communication présentée à 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) (p. 1031-1038).

Vollman, T. E., Berry, W. L., & Whybark, D. C. (1992). Manufacturing Planning and Control Systems, Richard D. Irwin. *Inc., Homewood, Illinois*.

Vollmann, T. E. (2005). *Manufacturing planning and control for supply chain management*: McGraw-Hill Education.

13^{th} *International Conference on Modeling, Optimization and Simuation* - MOSIM*'20 - November 12-14, 2020*
Agadir - Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

A MIN-MAX PATH APPROACH FOR BALANCING ROBOTIC ASSEMBLY LINES WITH SEQUENCE-DEPENDENT SETUP TIMES

Y. LAHRICHI

Université Clermont Auvergne
CNRS, LIMOS
63000 Clermont–Ferrand, France
youssef.lahrichi@uca.fr

L. DEROUSSI, N. GRANGEON, S. NORRE

Université Clermont Auvergne
LIMOS UMR CNRS 6158, antenne de l'IUT d'Allier
03100 Montluçon, France
laurent.deroussi@uca.fr, nathalie.grangeon@uca.fr, sylvie.norre@uca.fr

ABSTRACT: *We deal in this paper with SDRALBP-2, namely the Sequence-Dependent Robotic Assembly Line Balancing Problem of type 2. The problem is of industrial relevance due to the growing robotization of the assembly lines in the new Industry 4.0 era. Given a set of operations that are necessary to assembly a product and a set of robot types with different performances, the problem is concerned with addressing three decision problems simultaneously while minimizing a given objective. The first decision is to assign the operations to a given set of stations placed in a straight line [Balancing decision], the second decision is to sequence the operations in each station due the sequence-dependent setup times [Sequencing decision] and the third decision is to assign a robot to each station [Equipment selection decision]. We consider the objective of minimizing the cycle time, which is the maximum duration spent by a product in some station. We propose in this paper a method of type Sequence-First Balance-And-Select-Second. The proposed method embeds a dynamic programming algorithm (that solves a polynomial case) in a metaheuristic. Benchmark instances are used to evaluate the proposed method.*

KEYWORDS: *Line balancing, Robotic, Sequence-dependent setup times, Polynomial case, Min-max path, Metaheuristic.*

1 INTRODUCTION

We assist nowadays to the growing robotization of all manufacturing systems. This large-scale robotization is pushed by new industry 4.0 standards encouraging the use of cyber-physical systems. Cyber-physical systems are systems where robots or other physical components interact with cyber or software components in order to deliver a service or produce a good in ways that change with context. Besides, robots offer higher productivity and flexibility (US National Science Foundation).

Assembly lines follow the same robotization trend. More and more often, tasks in assembly lines are no longer performed by human operators (Nilakantan, Ponnambalam, Jawahar & Kanagaraj 2015), (Janardhanan, Li, Bocewicz, Banaszak & Nielsen 2019). Human operators are only concerned by supervising the production process while robots perform all the operations. We consider a straight assembly line. Such a line is a series of stations organized throw a straight line. In each station, a set of operations is performed on a product. The product is then moved from the current station to the next station and a new product is moved to the current station. The product is considered finished when it exits from the last station. A robotic assembly line is an assembly line where the operations are performed by robots. Balancing an assembly line is the problem of assigning the operations necessary to assemble a product to the stations. The maximum duration spent by a product on some station is called the cycle time.

Balancing a robotic assembly line raises two problems that are not usually considered jointly in literature:

- The equipment selection problem which is concerned with assigning a robot to each station. The relevance of the problem is justified by the different performances of the robots. Indeed, the duration of an operation depends on the type of robot used (Rubinovitz, Bukchin & Lenz 1993).
- The problem of sequencing the operations in each station. The latter is justified by the consideration of sequence-dependent setup. A setup time $t_{i,j,r}$ between operations i and j must be considered if operations j is performed just after op-

eration i by a robot r. The sequence-dependent setup times are considered to provide for the necessary tool change on the robot or handling on the product. We remark that the setup times are not only sequence-dependent but also robot-dependent.

The considered problem in then called the SDRALBP (*Sequence-Dependent Robotic Assembly Line Balancing Problem.*). If the considered objective is to minimize the cycle time given a fixed number of stations, then it is denoted SDRALBP-2.

We propose a method of type Sequence-First Balance-And-Select-Second to tackle this problem. This method relies on a novel algorithm, called minmax, that computes a min-max path in some auxiliary graph. We prove that the latter is optimal when a sequence of all operations is given. The select and balance subproblems can be polynomially solved thanks to minmax. The SDRALBP-2 is then reduced to finding the best sequence of operations. The sequencing subproblem is solved by metaheuristic.

The paper is organized as follows. The problem is described in section 2. A example is given in section 3. Our contribution is then positioned in literature in section 4. A mathematical formulation is described in section 5. The resolution approach is described in section 6 then tested on benchmark instances in section 7.

2 PROBLEM STATEMENT

Given a set N of operations, a set S of stations placed in a straight line and a set R of robot types, the SDRALBP, is concerned with addressing three decisions simultaneously:

- Balancing decision: Assign each operation to a station.
- (Equipment) Selection decision: Assign a robot to each station.
- Sequencing problem: Sequence the operations in each station.

The duration of an operation i depends on the type of robot r used and is denoted d_i^r. Operations are linked by precedence relations (when operation i precedes operation j, the station to which i is assigned should not be after that of j). Sequence-dependent setup times are also considered. A setup times $t_{i,i'}^r$ should be considered if operation i is performed just before operation i' in some station equipped by a robot of type r.

The workload of a station is the sum of durations and sequence-dependent setup times induced by the sequence of operations assigned to it. The cycle time stands for the maximum workload among the stations and is a key performance indicator of the assembly line.

n	Number of operations
N	Set of operations, indexed on $\{1, 2, \ldots, n\}$
s_{max}	Max. number of stations
S	Set of stations, indexed on $\{1, 2, \ldots, s_{max}\}$
n_r	Number of robot types available
R	Set of robot types, indexed on $\{1, 2, \ldots, n_r\}$
P	Set of couple$(i, j) \in N^2$ s.t. i precedes j
C	Cycle time
d_i^r $i \in N, r \in R$	Duration of operation i on robot of type r
$t_{i,i'}^r$ $i, i' \in N, r \in R$	Setup time between operations i and i' on a robot of type r

Table 1 – Notations used

In this study, the cycle time is the objective to minimize given a maximum number of station.

The same type of robot can be assigned to several stations without any limitation, i.e. we assume that we have enough robot units of each type of robot.

The notations introduced in table 1 are used all across the paper.

3 EXAMPLE

We illustrate the problem with a small instance. The different attributes of the instance are given as follows:

- Number of operations: $n = 10$.
- Number of types of robots: $n_r = 4$.
- Maximum number of stations: $s_{max} = 3$.

Precedence relations are illustrated in the precedence graph (figure 2). Durations and sequence-dependent setup times are given respectively in tables 2 and 3. A feasible solution is depicted in figure 1.

The solution is feasible since precedence relations are satisfied and the number of stations used does not exceed the maximum number of stations.

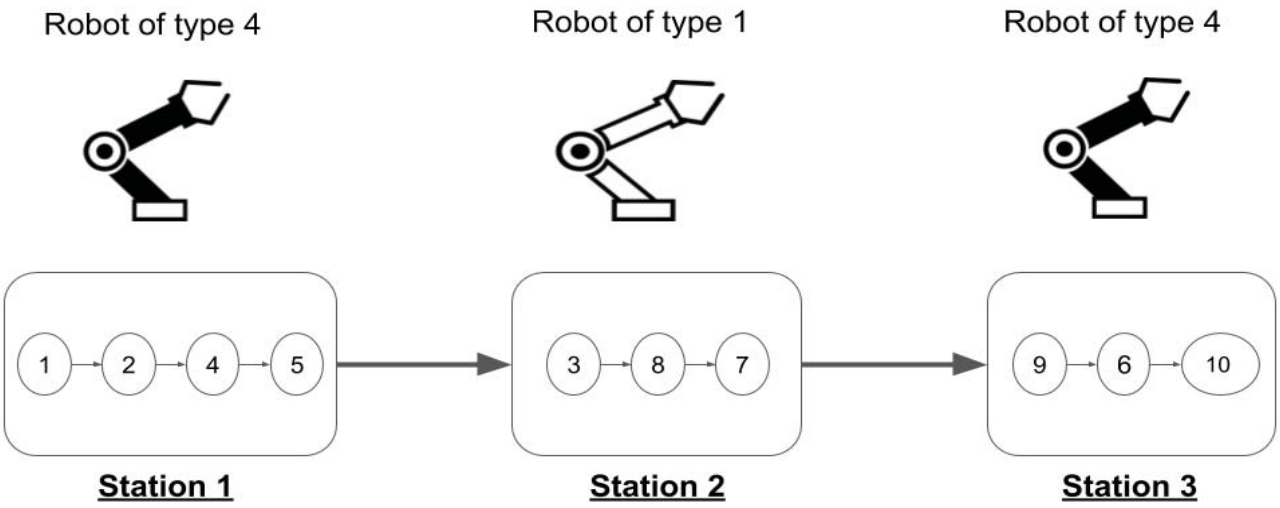


Figure 1 – Feasible solution

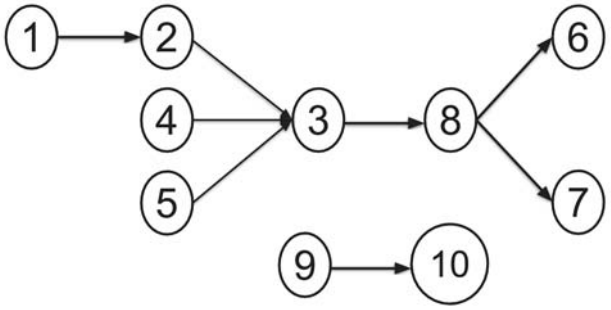


Figure 2 – Precedence graph

Op. \ Robot type	1	2	3	4
1	d_1^1 =3	4	4	2
2	$d_2^1 = 4$	3	3	2
3	1	3	2.3	1
4	3.4	7	4	2
5	3.5	5	1	1
6	2	5	4	1
7	1.3	8	2.4	3
8	5	5	3.1	2
9	3	5	2.4	2
10	5	7.5	1.1	3

Table 2 – Durations

The cycle time is obtained by computing the maximum among the workloads of the stations:

- On the first station, the workload is given by:

  $d_1^4 + t_{1,2}^4 + d_2^4 + t_{2,4}^4 + d_4^4 + t_{4,5}^4 + d_5^4 + t_{5,1}^4 = 7.6$

- On the second station, the workload is given by:

  $d_3^1 + t_{3,8}^1 + d_8^1 + t_{8,7}^1 + d_7^1 + t_{7,3}^1 = 9.3$

- On the third station, the workload is given by:

  $d_9^4 + t_{9,6}^4 + d_6^4 + t_{6,10}^4 + d_{10}^4 + t_{10,9}^4 = 7.6$

From the above calculation we can deduce the cycle time: $C = 9.3$.

4 STATE OF THE ART

The studied problem is a generalization of the Simple Assembly Line Balancing Problem. SDRALBP becomes a SALBP when $n_r = 1$ and $t_{i,j}^1 = 0, \forall i, j \in N$. SALBP is NP-Hard and has been extensively studied in literature. The interested reader can find a taxonomy of assembly line balancing problems in (Battaïa & Dolgui 2013).

The Sequence-Dependent Robotic Assembly line Balancing problem considers two particularities jointly:

- The consideration of the equipment selection problem: the problem is raised whenever the decider has to choose between different types of equipment with different performances in order to perform the assembly operations.

(a) Setup times of robots of type 1

Op.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	$t^1_{1,2}$=0.9	0.5	0.3	0.2	0.2	0.6	0.4	0.6	0.4
2	0.4	0	0.6	0.1	0.3	0.4	0.1	0.6	0.6	0.4
3	0.2	0.1	0	0.1	0.1	0.2	0.7	0.8	0.6	0.2
4	0.1	0.2	0.4	0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.6	0.3
5	0.5	0.5	0.9	0.4	0	0.7	2	0.7	0.6	0.3
6	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0	0.3	0.7	0.6	0.3
7	0.7	0.5	0.4	0.2	0.7	1	0	0.2	0.6	0.4
8	0.1	0.1	0.5	0.5	0.1	0.2	0.8	0	0.6	0.3
9	0.7	0.5	0.4	0.2	0.7	1	0.1	0.2	0	0.4
10	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1	0.2	0.5	0.2	0.6	0

(b) Setup times of robots of type 2

Op.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	$t^2_{1,2}$=0.4	0.5	0.4	0.5	0.7	0.5	0.7	0.5	0.7
2	0.1	0	0.4	0.4	0.2	0.4	0.1	0.2	0.5	0.2
3	0.1	0.3	0	0.4	0.6	0.7	0.3	0.2	0.5	0.2
4	0.1	0.2	0.5	0	0.4	0.4	0.5	1.5	0.5	0.2
5	0.5	0.5	0.9	0.4	0	0.7	2	0.7	0.5	0.2
6	0.2	0.5	0.4	0.3	0.4	0	0.4	0.2	0.5	0.1
7	0.3	0.5	0.4	0.3	0.7	1	0	0.1	0.5	0.1
8	0.5	0.5	0.1	0.1	0.4	0.2	0.7	0	0.5	0.1
9	0.7	0.5	0.4	0.2	0.7	1	0.1	0.2	0	0.4
10	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0

(c) Setup times of robots of type 3

Op.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	$t^3_{1,2}$=0.1	0.9	0.7	0.4	0.4	0.5	0.7	0.5	0.1
2	0.2	0	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	0.2	0.5	0.1
3	0.2	0.3	0	0.1	0.4	0.6	0.3	0.2	0.5	0.2
4	0.3	0.2	0.1	0	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.2
5	0.5	0.1	0.4	0.9	0	0.1	0.1	0.3	0.5	0.2
6	0.1	0.2	0.5	0.4	0.3	0	0.3	0.1	0.5	0.7
7	0.8	0.1	0.5	0.2	0.7	0.5	0	0.1	0.5	0.2
8	0.7	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.4	0	0.5	0.7
9	0.7	0.5	0.4	0.2	0.2	1	0	0.2	0	0.4
10	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0	0.6	0

(d) Setup times of robots of type 4

Op.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	$t^3_{1,2}$=0.2	0.3	0.4	0.2	0.1	0.2	0.2	0.5	0.7
2	0.5	0	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.5	0.2
3	0.2	0.1	0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.5	0.7
4	0.3	0.1	0.2	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.5	0.2
5	0.2	0.1	0.2	0.3	0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3
6	0.2	0.2	0.2	0.4	0.3	0	0.1	0.1	0.5	0.1
7	0.2	0.1	0.5	0.2	0.1	0.3	0	0.1	0.5	0.1
8	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.5	0	0.5	0.2
9	0.7	0.5	0.4	0.2	0.7	1	0.1	0.2	0	0.2
10	0.1	0.1	0.5	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.5	0

Table 3 – Setup times

The Robotic Assembly Line Balancing Problem (RALBP) is defined in (Rubinovitz et al. 1993). In the context of RALBP, different types of robots are available to perform the operations. The durations of the operations depend on the type of robot and the decider has to assign a single type of robot to each station. The RALBP has gained great importance due to its industrial relevance and due to the academic challenge it raises. The literature on RALBP is summarized in table 4. We can partition the literature on RALBP within two categories. Some authors consider that the same type of robot can be selected by multiple stations without any limitation (Rubinovitz et al. 1993), (Nilakantan et al. 2015), (Borba et al. 2018) whereas other authors consider that each robot can be selected by at most one station (Gao et al. 2009), (Janardhanan et al. 2019). The first assumption is the original assumption of RALBP as defined in (Rubinovitz et al. 1993), it is assumed in this paper.

- The consideration of sequence-dependent setup times: Sequence-dependent setup times in the context of assembly lines were introduced in (Andres, Miralles & Pastor 2008). Setup times are necessary to provide for tool change or product handling that can occur between two operations. The Sequence-Dependent Simple Assembly Line Balancing problem (SDSALBP) raises the decision of sequencing the operations in each station. Many authors have considered sequence-dependent setup times in the context of assembly lines: (Borisovsky, Delorme & Dolgui 2014), (Martino & Pastor 2010), (Lahrichi, Grangeon, Deroussi & Norre 2020).

The problem considered in this paper, SDRALBP-2, is concerned with minimizing the cycle time while addressing the balancing, selection and sequencing decisions simultaneously. To the best of our knowledge, the three previous decisions have never been addressed simultaneously in literature expect in (Janardhanan et al. 2019). Besides, (Janardhanan et al. 2019) assume that each robot can be selected at most once while we assume in this paper that each type of robot can be selected by multiple stations without any limitations. The results obtained in (Janardhanan et al. 2019) can not be compared directly to our results, they give an upper bound for our results.

The resolution approach described in this paper could be seen as a Sequence-First Balance-And-Select-Second algorithm. We propose a min-max path algorithm that addresses optimally the selection and the balancing decisions in polynomial time provided that a sequence of all operations is given. The later

Table 4 – Position of our study in the literature.

Article	Objectives			Sequence-dependent setup times
	Z_1	Z_2	Z_3	
(Rubinovitz et al. 1993)		✓		
(Levitin, Rubinovitz & Shnits 2006)	✓			
(Gao, Sun, Wang & Gen 2009)	✓			
(Yoosefelahi, Aminnayeri, Mosadegh & Ardakani 2012)	✓		✓	
(Nilakantan et al. 2015)	✓			
(Çil, Mete & Ağpak 2016)	✓	✓	✓	
(Borba, Ritt & Miralles 2018)	✓			
(Janardhanan et al. 2019)	✓			✓
Our study	✓			✓

Z_1: Cycle time, Z_2: Number of stations, Z_3: Cost of robots used

novel algorithm is then integrated in a metaheuristic framework.

5 MATHEMATICAL FORMULATION

To clarify the definition of the problem, we give a linear formulation based on the one from (Janardhanan et al. 2019). The latter is considering a limited number of robots per type of robot, we adapt it for the case of an unlimited number of robots by type. The formulation of (Janardhanan et al. 2019) is itself adapted from (Andres et al. 2008).

We use i to index an operation, s to index a station, j to index a position in the sequence of operations assigned to a station and r to index a type of robot. The following **variables** are used:

$$x_{i,s,j,r} = \begin{cases} 1 & \text{If the operation } i \text{ is assigned to the station } s \text{ at the } j\text{-th position of its sequence and performed by a robot of type } r. \\ 0 & \text{Otherwise.} \end{cases}$$

$$y_s = \begin{cases} 1 & \text{If at least one operation is assigned to station } s. \\ 0 & \text{Otherwise.} \end{cases}$$

$$v_{s,r} = \begin{cases} 1 & \text{If a robot of type } r \text{ is assigned to station } s. \\ 0 & \text{Otherwise.} \end{cases}$$

$$z_{i,i',s,r} = \begin{cases} 1 & \text{If operation } i \text{ is performed just before operation } i' \text{ at station } s \text{ by a robot of type } r. \\ 0 & \text{Otherwise.} \end{cases}$$

$$\mathrm{w}_{i,s} = \begin{cases} 1 & \text{If the operation } i \text{ is assigned to the last position in the sequence of station } s. \\ 0 & \text{Otherwise.} \end{cases}$$

C = Cycle time

We minimize the cycle time ($Min\ C$) under the constraints (1)-(12).

$$\sum_{s\in S}\sum_{j\in N}\sum_{r\in R} x_{i,s,j,r} = 1, \forall i \in N \tag{1}$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{r\in R} x_{i,s,j,r} \leq 1, \forall s \in S, \forall j \in N \tag{2}$$

$$\sum_{i\in N} x_{i,s,j,r} \leq v_{s,r}, \forall s \in S, \forall j \in N, \forall r \in R \tag{3}$$

$$\sum_{r\in R} v_{s,r} = y_s, \forall s \in S \tag{4}$$

$$\sum_{i\in N} x_{i,s,j+1,r} \leq \sum_{i\in N} x_{i,s,j,r} \quad \forall s \in S, \forall j \in N - \{n\}, \forall r \in R \tag{5}$$

$$y_{s+1} \leq y_s, \forall s \in S - \{s_{max}\} \tag{6}$$

$$\sum_{s\in S}\sum_{j\in N}\sum_{r\in R}(n.(s-1)+j)x_{i,s,j,r} \leq \sum_{s\in S}\sum_{j\in N}\sum_{r\in R}(n.(s-1)+j)x_{i',s,j,r}, \forall (i,i') \in P \tag{7}$$

$$\sum_{i\in N}\sum_{j\in N}\sum_{r\in R} d_{i,r}.x_{i,s,j,r} + \sum_{i\in N}\sum_{i'\in N}\sum_{r\in R} t_{i,i',r}.z_{i,i',s,r} \leq C.y_s, \forall s \in S \tag{8}$$

$$x_{i,s,j,r} + x_{i',s,j+1,r} \leq 1 + z_{i,i',s,r}, \quad \forall i,i' \in N^2, i \neq i', \forall j \in N - \{n\}, \forall s \in S, \forall r \in R \tag{9}$$

$$x_{i,s,j,r} - \sum_{i' \in N; i' \neq i} x_{i',s,j+1,r} \leq w_{i,s} \quad \forall i \in N, \forall s \in S, \forall j \in N - \{n\} \tag{10}$$

$$x_{i,s,n,r} \leq w_{i,s}, \forall i \in N, \forall s \in S, \forall r \in R \tag{11}$$

$$w_{i,s} + x_{i',s,1,r} \leq 1 + z_{i,i',s,r} \quad \forall i \in N, i' \in N, i \neq i', \forall s \in S, \forall r \in R \tag{12}$$

The set of constraints (1) ensures that all operations must be assigned once and only once. (2) ensures that at most one operation can be assigned to the same position. (3) ensures that an operation is carried out by a robot of type r on a station s only if the station s is equipped by a robot of type r and (4) ensures that no more than one type of robot can be assigned to a station. (5) ensures that a position is only occupied by an operation if all of its previous positions are also occupied. (6) ensures that a station is only used if the previous stations are also used. (7) ensures that the precedence constraints are respected. (8) ensures that the cycle time constraints are respected on all stations. (9) ensures that $z_{i,i',s,r} = 1$ when i and i' follow each other on the station s (equipped by the robot r). (10) - (12) verify that $z_{i,i',s,r} = 1$ when i is the last operation assigned to the station s and i' the first operation assigned at the station s (equipped by the robot r).

6 RESOLUTION APPROACH

6.1 Overview and basic definitions

An algorithm of type Sequence-First Balance-And-Select-Second addresses the sequencing subproblem in the first step by giving a sequence of all operations called *giant sequence*. The balancing and the selection subproblems are then solved in the second step while respecting the giant sequence. We give some basic definitions and the algorithm used to obtain a giant sequence. Then, the algorithm to address the balancing and the selection decisions is described in subsection 6.2. This algorithm is then embedded in a metaheuristic (subsection 6.3).

Definition 6.1. *(Giant sequence) Given an instance of the SDRALBP, a giant sequence is a permutation of all its operations .*

Definition 6.2. *(A solution satisfying a giant sequence) A solution s of the SDRALBP is said to satisfy a giant sequence $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_n)$ if for all σ_i, σ_j such that $i < j$ either σ_i and σ_j are assigned to the same station in s or the station to which the operation σ_i is assigned must be before the station to which σ_j is assigned.*

Definition 6.3. *(Compatible giant sequence) A giant sequence σ is said to be compatible with respect to an instance of the SDRALBP if there exists at least a feasible solution satisfying σ.*

Theorem 6.4. *If we consider SDRALBP-2, a compatible giant sequence is simply a giant sequence respecting precedence constraints.*

Proof. Indeed, given a giant sequence respecting precedence constraints a feasible solution satisfying this giant sequence could be obtained by allocating all the operations of the giant sequence to a single station. □

Remark 1. *A compatible giant sequence respecting precedence constraints could be obtained thanks to Algorithm 1.*

Algorithm 1 Algorithm to build a giant sequence respecting precedence constraints

INPUT: An instance of the SDRALBP.
OUTPUT: A giant sequence σ respecting precedence constraints.

1: **while** σ is of size $< n$ **do**
2: Select randomly and uniformly i an operation without predecessor or such that all predecessors have already been included in σ.
3: Append i to σ
4: **end while**

6.2 Giant sequence fixed: polynomial case

We suppose in this subsection that the giant sequence is fixed. It is equivalent to the case where the precedence graph is a path of length n. We suppose without loss of generality that the giant sequence $\sigma = (1, 2, \ldots, n)$.

The resolution approach relies on an auxiliary graph $\mathcal{H}_{\mathcal{I}}(\sigma) = (V, A)$. The graph $\mathcal{H}_{\mathcal{I}}(\sigma) = (V, A)$ is directed, composed of the set of nodes V and the set of arcs A. The set of nodes is given by the set of operations plus an additional node corresponding to a fictitious operation, i.e $V = \{0\} \cup N$. An arc (i, j) from operation i to operation j refers to a station, the subsequence assigned to this station is $(i+1, i+2, \ldots, j)$ and the robot of type r selected for this station should minimize the workload induced by this subsequence: $\sum_{k=i+1}^{j} d_k^r + \sum_{k=i+1}^{j-1} t_{k,k+1}^r + t_{j,i+1}^r$. The arcs set A is given by all the arcs (i, j) such that $i < j$. Besides, $\mathcal{H}_{\mathcal{I}}(\sigma)$ is weighted. The weight of the arc (i, j) is given by:

$$c_{i,j} = Min_{r \in R}\{ \sum_{k=i+1}^{j} d_k^r + \sum_{k=i+1}^{j-1} t_{k,k+1}^r + t_{j,i+1}^r \}$$

$c_{i,j}$ corresponds to the minimum time required to perform the subsequence $(i + 1, \ldots, j)$. Any value of r

Algorithm 2 Minmax

INPUT ($\mathcal{I}$,σ) where $\mathcal{I}$ is an instance of the SDRALBP-2 problem and σ is a giant sequence respecting precedence constraints. We suppose without loss of generality that $\sigma = \{1, 2, ..., n\}$
OUTPUT S: An optimal solution (with the minimal cycle time C^*) respecting σ

```
1: Build the graph H_I(σ)
2: L_0 := {(0,0)}
3: for t=1 to n do
4:    L_t := ∅
5: end for
6: for t=0 to n-1 do
7:    for all i/(t,i) ∈ A (Propagate labels from L_t) do
8:       for all (a_t, b_t) ∈ L_t do
9:          if (b_t < s_max − 1 or i = n) then
10:            (a_i, b_i) := (Max{a_t, c_{t,i}}, b_t + 1)
11:            if (a_i, b_i) is not dominated by an element of L_i then
12:               L_i := L_i ∪ {(a_i, b_i)}
13:               if (a_i, b_i) dominates some element (a'_i, b'_i) ∈ L_i then
14:                  L_i := L_i \ {(a'_i, b'_i)}
15:               end if
16:            end if
17:         end if
18:      end for
19:   end for
20: end for
21: if L_n ≠ ∅ then
22:   C* := Min_{(a_i,b_i)∈L_n}(a_i)
23:   Decode the path of cost C* to build S
24: end if
```

that gives this min represents the type of robot assigned to this station. The construction of the auxiliary graph can be performed within time in $O(n^3.n_r)$.

The optimal solution among the solutions satisfying a giant sequence σ can be obtained by computing a path from 0 to n in $\mathcal{H}_{\mathcal{I}}(\sigma)$ that minimises the maximum weight of an arc **using no more than s_{max} arcs**. In graph theory, the problem is known as a *bottleneck path* or *min-max path* (Chechik, Kaplan, Thorup, Zamir & Zwick 2016) which consists in finding a path between a pair of vertices such as the weight of an arc of maximum weight is minimized. This problem is polynomial. Since the path should not exceed s_{max} arcs, we are dealing with a constrained min-max path which can also be computed in polynomial time thanks to Algorithm 2 that we call minmax. It could be seen as an adaptation of Bellman-Ford algorithm to solve the problem of finding a min-max path constrained not to exceed s_{max} arcs in the graph $\mathcal{H}_{\mathcal{I}}(\sigma)$. It uses a set of labels L_i for node i. Every label $l = (a, b)$ in L_i corresponds to a path (partial solution) between 0 and i where a denotes the cycle time used by the path represented by the label l and b denotes the number of stations used by this path (i.e. the number of arcs in the path).(a, b) is said to be dominated by (a', b') if $a' \leq a$ and $b' \leq b$. The dominance rule limits the number of labels per node to s_{max}.

Algorithm 2 starts with fictitious node 0 labelled $L_0 := \{(0, 0)\}$ and continues with the other nodes following the giant sequence. For every node t and every label $(a_t, b_t) \in L_t$, the algorithm explores every outgoing arc (t, i) and tries to propagate it (i.e add a label to the list of labels of node i denoted L_i) if $(Max\{a_t, c_{t,i}\}, b_t + 1)$ is not dominated by a label of L_i. If so, the label $(Max\{a_t, c_{t,i}\}, b_t + 1)$ is added to L_i and all labels dominated by $(Max\{a_t, c_{t,i}\}, b_t + 1)$ are deleted from L_i. The min-max path cost (cycle time) is stored in C^*. The path is decoded by creating a station for each arc $c_{i,j}$ which is part of the path. The subsequence $(i+1, i+2, \ldots, j)$ is assigned to this station. The type of robot selected for this station is any type of robot minimizing the workload induced by this subsequence. The algorithm runs in $O(n^4 + n^3.n_r)$. The obtained path represents an optimal balancing (and robot selection) solution.

6.3 An hybrid metaheuristic

The minmax algorithm could be used to solve the problem optimally given a giant sequence of operations. To solve the SDRALBP-2, we should deter-

mine the best giant sequence.

We use metaheuristic frameworks in order to explore the space of giant sequences. The minmax algorithm is then used as a decoding algorithm and an evaluation function.

We use Iterated local search (ILS). A complete description of ILS algorithm could be found in (Lourenço, Martin & Stützle 2010). A local search is iterated a number of times starting from a perturbation of the best know solution. The stopping criterion of the local search is the number of solutions visited while the stopping criterion of the ILS is the number of iterations of local search. The neighbours are chosen randomly. The neighbourhood move used is described below. The perturbation stands for applying the move three times.

We choose an insertion move that respects precedence constraints. A random operation is chosen on the giant sequence then it is re-inserted between the last operation that precedes it and the first operation that succeeds it with respect to precedence constraints.

7 EXPERIMENTATION

The experiments presented in this section are preliminary. Other experiments are being held. The instances are taken from (Janardhanan et al. 2019). They are partitioned within three classes:

- Instances with null setup times: they correspond to the same instances of (Gao et al. 2009).
- Instances with low setup times: they correspond to the instances of (Gao et al. 2009) to which setup times are added and generated randomly and uniformly within $[0, 0.25 * min_{i,r} d_{i,r}]$.
- Instances with high setup times: they correspond to the instances of (Gao et al. 2009) to which setup times are added and generated randomly and uniformly within $[0, 0.75 * min_{i,r} d_{i,r}]$.

We have $s_{max} = n_r$ for these instances. The only method available in literature for SDRALBP-2 is suggested in (Janardhanan et al. 2019). Their method gives an upper bound for ours because they don't allow themselves to use a type of robot several times in different stations. Our method can also apply for RALBP (SDRALBP with null setup times) by considering that the setup times are null. Since the RALBP is much more investigated than SDRALBP, we also compare our method on instances with null setup times with the better-performing algorithms from RALBP literature: (Nilakantan et al. 2015), (Borba et al. 2018). The RALBP does not raise any sequencing problem, it is only concerned with the balancing and robot selection decisions. Even if our method is not dedicated to RALBP, this comparison can give an idea about the performance of our method. Table 5 shows the experiments on instances with null setup times (RALBP) and table 6 shows experiments on instances with low and high setup times. In those tables, references denote the value of the cycle time obtained in those references while C and C_{10} denote the cycle time obtained respectively with a stochastic local search where 10 000 neighbours are visited and an ILS of 10 iterated local searches where 10 000 neighbours are visited in each. We do not have the results of (Janardhanan et al. 2019) for instances with $n \geq 89$.

CPU times needed to compute C are comparable with those from (Janardhanan et al. 2019) for $n = 11..70$ since they are generally below 50 seconds (i.e less than 5 microseconds necessary to run the minmax algorithm). The CPU time grows then drastically while increasing the value of n. The CPU times remain very reasonable up to $n = 148$. For $n = 148$ and $n_r = 29$, 0.1 seconds is needed to perform a single minmax run. For instances with $n = 297$, this value can rise up to 1.7 second for biggest n_r. In order to be used efficiently in a metaheuristic, the minmax algorithm should be applied many times to explore as much neighbors as needed. The minmax algorithm is very fast for instances with $n = 1..70$ (small instances) and reasonable for instances with $n = 89..148$ (medium and big instances). However for very big instances $n = 297$ with high number of possible robots, the CPU times of the minmax algorithm exceeds one second which limits the number of neighbours that can be visited in some metaheuristic. For this reason, results for instances with $n = 297$ and $n = 148$ (C_{10}) are not presented in this preliminary research.

Table 5 shows that even if our method is not dedicated to RALBP, it can retrieve most optimal values obtained by (Borba et al. 2018) and is far better than (Nilakantan et al. 2015) which is dedicated to RALBP.

Tables 5 and 6 show the benefit of the assumption allowing the use of the same robot type in multiple stations. Indeed, the cycle time C (and C_{10}) is much smaller than the cycle time from (Janardhanan et al. 2019) for most instances. C_{10} is better than C at the expense of 10 times higher CPU time. The tables also show that the consideration of setup times has a real impact on the cycle time. This justifies that the sequence-dependent setup times cannot be negligible and should be taken into consideration in the modelling/optimization step of the Robotic Assembly Line Balancing Problem.

Table 5 – Instances with null setup times

n	s_{max}, n_r	(Nilakantan et al. 2015)	(Borba et al. 2018)	(Janardhanan et al. 2019)	C	C_{10}
11	4	-	-	128	126	126
25	3	503	503*	503	**503**	**503**
	4	327	291*	327	294	**291**
	6	200	194*	213	195	**194**
	9	110	109*	121	**109**	**109**
35	4	341	341*	449	342	**341**
	5	332	329*	344	**329**	**329**
	7	211	201*	222	**201**	**201**
	12	103	93*	112	98	**93**
53	5	449	449*	559	**449**	**449**
	7	294	283*	320	284	**283**
	10	221	203*	239	213	**203**
	14	142	134*	162	137	**134**
70	7	430	391*	448	401	392
	10	264	233*	271	238	234
	14	194	170*	201	183	176
	19	140	121*	152	129	126
89	8	460	436*	-	446	445
	12	320	296*	-	309	301
	16	219	205*	-	211	207
	21	170	156*	-	164	161
111	9	523	468	-	491	472
	13	321	275	-	295	287
	17	240	212	-	230	224
	22	182	154	-	173	166
148	10	593	550	-	583	-
	14	419	351	-	376	-
	21	273	225	-	244	-
	29	189	154	-	171	-

*: optimal solution

Table 6 – Instances with low and high setup times

Instance		Low Setup			High Setup		
n	$s_{max}(= n_r)$	(Janardhanan et al. 2019)	C	C_{10}	(Janardhanan et al. 2019)	C	C_{10}
11	4	137	137	137	152	152	151
25	3	516	536	535	579	584	579
	4	346	303	303	380	343	343
	6	227	203	198	242	216	214
	9	131	116	116	142	125	121
35	4	462	352	352	494	376	374
	5	355	335	335	392	368	365
	7	237	208	208	261	225	224
	12	118	100	100	131	113	113
53	5	574	471	461	619	508	486
	7	334	286	286	359	319	308
	10	256	223	213	276	244	237
	14	170	146	143	185	155	155
70	7	469	426	408	507	466	448
	10	282	252	246	309	270	266
	14	211	189	182	233	206	202
	19	158	135	131	175	145	144
89	8	-	465	458	-	491	491
	12	-	318	308	-	344	344
	16	-	224	220	-	240	238
	21	-	166	163		184	181
111	9	-	517	495	-	541	521
	13	-	306	301	-	329	228
	17	-	233	233	-	257	255
	22	-	178	172	-	193	191
148	10	-	610	-	-	685	-
	14	-	391	-	-	431	-
	21	-	256	-	-	289	-
	29	-	182	-	-	202	-

8 CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In this paper, a solvable polynomial case for the sequence-dependent robotic assembly line balancing problem is derived. It is solved thanks to a minmax path algorithm. We also give an interesting use case of the minmax proposed algorithm: embedding it on a metaheuristic. This findings introduce a new solution encoding in a metaheuristic that searches in a much smaller space than traditional encodings. The first experimentation are very promising. Several directions could be taken following this research :

- Reducing the CPU time of the minmax algorithm by limiting the number of labels thanks to upper bounds.
- Making more experiments on different sets of instances.
- Using more sophisticated metaheuristics embedding the minmax algorithm.
- Adapting the method for the case where each robot can be used at most once.
- Deriving other use cases of the minmax algorithm.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the support received from the *Agence Nationale de la Recherche* of the French government through the program "Investissements d'Avenir"(16-IDEX-0001 CAP 20-25).

References

Andres, C., Miralles, C. & Pastor, R. (2008). Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times, *European Journal of Operational Research* **187**(3): 1212–1223.

Battaïa, O. & Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solutionapproaches, *International Journal of Production Economics* **142**(2): 259–277.

Borba, L., Ritt, M. & Miralles, C. (2018). Exact and heuristic methods for solving the robotic assembly line balancing problem, *European Journal of Operational Research* **270**(1): 146–156.

Borisovsky, P. A., Delorme, X. & Dolgui, A. (2014). Balancing reconfigurable machining lines via a set partitioning model, *International Journal of Production Research* **52**(13): 4026–4036.

Chechik, S., Kaplan, H., Thorup, M., Zamir, O. & Zwick, U. (2016). Bottleneck paths and trees and deterministic graphical games, *33rd Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS 2016)*, Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik.

Çil, Z. A., Mete, S. & Ağpak, K. (2016). A goal programming approach for robotic assembly line balancing problem, *IFAC-PapersOnLine* **49**(12): 938–942.

Gao, J., Sun, L., Wang, L. & Gen, M. (2009). An efficient approach for type ii robotic assembly line balancing problems, *Computers & Industrial Engineering* **56**(3): 1065–1080.

Janardhanan, M. N., Li, Z., Bocewicz, G., Banaszak, Z. & Nielsen, P. (2019). Metaheuristic algorithms for balancing robotic assembly lines with sequence-dependent robot setup times, *Applied Mathematical Modelling* **65**: 256–270.

Lahrichi, Y., Grangeon, N., Deroussi, L. & Norre, S. (2020). A new split-based hybrid metaheuristic for the reconfigurable transfer line balancing problem, *International Journal of Production Research* pp. 1–18.

Levitin, G., Rubinovitz, J. & Shnits, B. (2006). A genetic algorithm for robotic assembly line balancing, *European Journal of Operational Research* **168**(3): 811–825.

Lourenço, H. R., Martin, O. C. & Stützle, T. (2010). Iterated local search: Framework and applications, *Handbook of metaheuristics*, Springer, pp. 363–397.

Martino, L. & Pastor, R. (2010). Heuristic procedures for solving the general assembly line balancing problem with setups, *International Journal of Production Research* **48**(6): 1787–1804.

Nilakantan, J. M., Ponnambalam, S. G., Jawahar, N. & Kanagaraj, G. (2015). Bio-inspired search algorithms to solve robotic assembly line balancing problems, *Neural Computing and Applications* **26**(6): 1379–1393.

Rubinovitz, J., Bukchin, J. & Lenz, E. (1993). Ralb–a heuristic algorithm for design and balancing of robotic assembly lines, *CIRP annals* **42**(1): 497–500.

Yoosefelahi, A., Aminnayeri, M., Mosadegh, H. & Ardakani, H. D. (2012). Type ii robotic assembly line balancing problem: An evolution strategies algorithm for a multi-objective model, *Journal of Manufacturing Systems* **31**(2): 139–151.

L'INTEGRATION DES FACTEURS HUMAINS DES LA PREMIERE PHASE DE CONCEPTION : APPLICATION SUR LA PENIBILITE

Rémy HOUSSIN, Oussama LEMOUCHI

Université de Strasbourg, CSIP-ICube
Strasbourg, France
remy.houssin@unistra-fr, oussama.lemouchi@etu-unistra.fr

RESUME : *La prise en compte des facteurs humains dans la conception des systèmes de production est une nécessité imposée par les directives et les normes. Mais aussi elle est devenue un objectif des entreprises conceptrices des machines et installatrices des systèmes manufacturiers pour améliorer la performance de leurs artefacts. Dans ce papier, à partir d'une étude de terrain et en respectant les normes et les réglementations en vigueur, nous proposons de remonter des données et des informations concernant l'utilisation des artefacts (machine ou système) pour les prendre en compte dès la phase de conception. Pour cela nous avons choisi une méthode proposée dans la littérature pour la compléter par les données remontées de l'utilisation. Une application sur la prise en compte de la pénibilité de travail est présentée toute au long de l'article pour démontrer les avantages et les limites de la méthode.*

MOTS-CLES : *Facteurs humains, méthode de conception, estimation, pénibilité, retour de terrain,*

1 INTRODUCTION

Dans le calcul des droits à la retraite en 2010, la pénibilité du travail n'est pas prise en compte. Mais depuis le 1er Janvier 2015 le compte personnel de prévention de la pénibilité est entré en vigueur. Ceci a eu deux effets :

1- Le premier consistait à établir un état des lieux des conditions de travail dans les ateliers de production existants, et mettre en place, pour les postes soumis à la pénibilité, des moyens de prévention pour supprimer ou diminuer les risques.
2- Le deuxième (pour les entreprises conceptrices des machines et installatrices des systèmes de systèmes manufacturiers) est de prendre en compte cette pénibilité lors de la conception de ces systèmes.

L'objectif de ce papier est de proposer une méthode pour compléter et remonter des informations ergonomiques vers le processus de conception. Nous savons que la conception de point de vue technique (Pahl et Beitz, 1996) ; (Rouse et Cody. 1988) n'est plus suffisante pour concevoir un système performant (Zhou et al. 2016) ; (Sun et al 2109). Dans ce sens, le concept de prévention intégrée a été défini et présenté dans de nombreux articles (ISO 12100 2010), (Falck et Rosenqyist 2012), (Directive CE 2006) , (Hoyos-Ruiz et al. 2017), (Ghemrahoui et al. 2009), (Feno et al. 2018), (de Galvez et al. 2017)). Pour pouvoir concevoir un système utilisable dans les entreprises avec un niveau de risques ergonomique et de sécurité minimum autorisés par la loi, nous proposons de faire une estimation de la pénibilité pendant la phase de conception des systèmes de production dans un contexte industrie 4.0 (Martin et al. 2019).

1.1 Données de terrain

Dans le document unique de sécurité de chaque entreprise, il est recommandé de préciser des points comme les suivants :
- D'une évaluation des risques par poste.
- Des fiches de sécurité des postes.
- Les fiches de données de sécurité des utilisateurs.
- Evaluation des TMS par poste.
- Evaluation du bruit par poste.
- etc.

La question traitée dans cette article est d'identifier à partir des bonnes pratiques industrielles, les informations à remonter pour intégrer en conception le maximum de facteurs humains liés en particulier à la pénibilité. Pour cela nous avons utilisé la méthode DMAIC (définir, mesurer, analyser, améliorer et contrôler les mesures de préventions à prendre en compte dès la conception). Cette méthode est appliquée sur un système existant dans l'objectif d'améliorer la conception des systèmes similaires futurs et de proposer une démarche répondants aux conditions d'utilisation de tels types de systèmes.
Pour cela nous avons suivi les étapes suivantes :
- définition l'état des lieux de l'ergonomie et de la sécurité de tous les postes de l'atelier de production.
- Mise en place d'outils de mesures et des outils de travail pour gérer les facteurs de risque.
- Rechercher des moyens afin d'éliminer ou de diminuer les risques dépassant les seuils.
- Fournir une évaluation des six facteurs augmentant la pénibilité au travail.

1.2 Eléments constitutifs de la pénibilité

Selon le code de travail, il faut éliminer toute exposition du travailleur à un ou plusieurs facteurs de risques pro-

fessionnels susceptibles de laisser des traces durables, identifiables et irréversibles sur sa santé.
Depuis le 1er Juillet 2016, dix facteurs identifiés à l'origine de l'augmentation de la pénibilité sont entrés en vigueur avec leurs seuils réglementaires :
Les facteurs de la pénibilité au travail et de risques définis par le code de travail sont classés en :
1- Les contraintes physiques marquées
2- L'environnement physique agressif
3- Certains rythmes de travail
Dans la suite en section 2, la méthode d'intégration des informations d'utilisation dès la première phase de la conception est illustrée. Avant de conclure et présenter quelques perspectives, dans la troisième section nous développons nos travaux sur l'intégration de la pénibilité en conception et présentons les résultats obtenus.

2 L'INTEGRATION DE L'USAGE EN LA CONCEPTION

Nous utilisons, dans ce travail, la méthode proposée par Sun et al. 2018. En se basant sur le retour de terrains, l'objectif est de démontrer et d'analyser la faisabilité de la méthode d'intégration des informations d'utilisation dès la première phase de la conception.

Dans (Sun et al. 2019) et (Sadeghi et al. 2016) les auteurs ont présenté de riches états de l'art contenant l'intégration des facteurs humains et ergonomiques dans les différentes phases et démarches de conception.
La clé pour parvenir à faire cette intégration est de comprendre la conception, dont son objectif principal est d'obtenir un produit/système qui correspond à l'utilisation et aux exigences d'utilisateur du point de vue, de la facilité d'utilisation, de la sécurité de l'utilisateur, de la fiabilité et de l'efficacité dans le lieu du travail (Mc Ruer, 1980 ; Redström, 2006) et, en particulier, à la prise en compte de la pénibilité lors de l'utilisation de l'artefact (système ou machine).
Sun et al. (2013) a proposé une méthode systématique prenant en compte les informations liées à l'utilisation.
Sun dans (Sun et al. 2018) améliore la première proposition en intégrant le cadre « fonction-tâche-comportement » à trois niveaux (Fig.1) et en se basant sur la conception simultanée du produit/système et de son manuel d'utilisation. Ces documents d'utilisation contiennent très peu d'informations concernant l'évaluation de l'utilisation dans les conditions exigées par les directives européennes. De nombreux utilisateurs ne comptent pas sur ces documents lors de l'utilisation quotidienne de leur machine (Norman 1988).

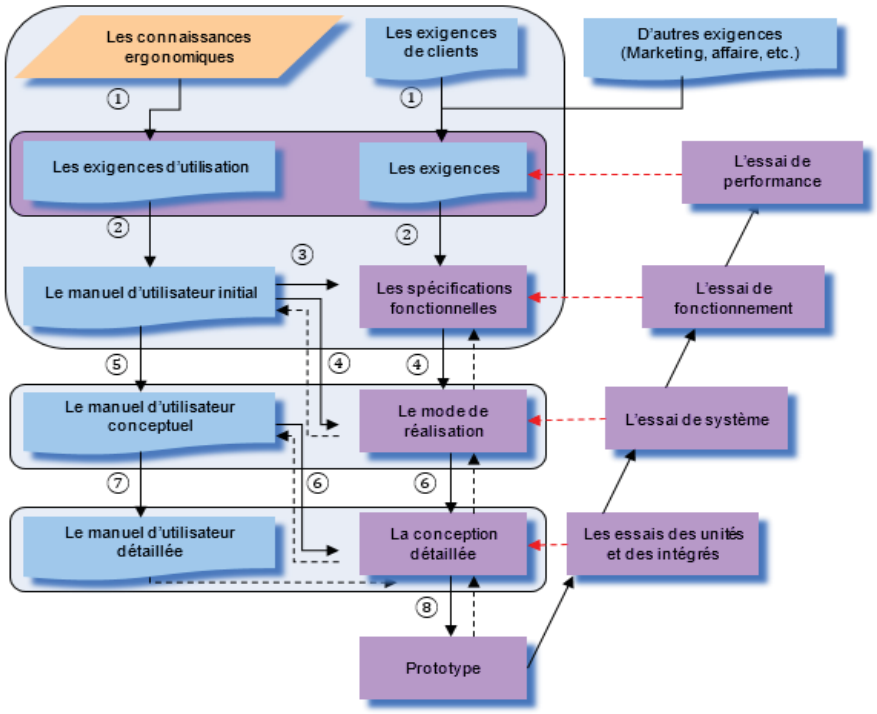


Figure 1 La Méthodologie proposée par Sun et al. 2019

Dans la méthode proposée par Sun et al., le concepteur définit le manuel d'utilisation initial qui dirige les spécifications fonctionnelles et le mode de réalisation des fonctions manuelles suivant les exigences de l'utilisation. A ce niveau, le concepteur définit les tâches pour réaliser les fonctions prévues dans les spécifications. Il distingue les tâches effectuées par le produit en tant que tâches techniques, et les tâches effectuées par l'utilisateur en tant que tâches sociotechniques. Dans le deuxième niveau, le manuel d'utilisation initial sera détaillé pour donner un manuel d'utilisation conceptuel qui est la ligne directrice de la conception détaillée. A ce niveau, le concepteur va proposer la structure qui remplit les fonctions techniques compatibles avec les tâches sociotechniques (manuelles) à réaliser par l'utilisateur.
Finalement, dans le troisième niveau, le concepteur affine les tâches réalisées par l'utilisateur et celles à réaliser par la structure après avoir réalisé la conception dé-

taillée de la structure. Ensuite, il analyse l'interaction entre le comportement de l'utilisateur et le comportement du système afin de vérifier la performance globale du système (machine) et son utilisateur.
Cependant Sun, dans ses travaux, ne présente pas comment ce manuel d'utilisation sera défini et élaboré sur les trois niveaux cités ci-dessous ni à partir de quelles données et informations.
Il a été noté que la ligne directrice de la méthode est d'éviter les mauvaises interactions entre le système(machine) et son utilisateur. Dans l'ensemble, toutes les interactions qui causent un problème ergonomique, ou nuisent à la sécurité et/ou à la santé de l'utilisateur doivent être éliminées.

3 LA PRISE EN COMPTE DE LA PENIBILITE DES LA CONCEPTION

Dans un premier temps nous avons défini les critères à prendre en compte :
1- Répondre à une obligation légale, selon l'article L4121-3-1 du Code du travail.
2- Préserver la santé et la sécurité des travailleurs : la nécessité d'évaluer les risques professionnels ne résulte pas uniquement du constat du grand nombre d'accidents de travail et de maladies professionnelles mais de prévenir leurs apparitions.
3- Contribuer à la performance du système°: Les conséquences importantes d'un point de vue humain et sur les performances économiques de l'entreprise. Cela permet de diminuer les coûts directs et indirects.
4- Améliorer et renforcer les relations sociales : les démarches de prévention participatives permettent de favoriser les échanges

Ensuite et après avoir rassemblé les données nécessaires à une bonne approche d'un point de vue législatif, nous sommes allés sur le terrain pour identifier les facteurs de la pénibilité. Nous avons identifié des postes existants d'un atelier similaire au poste futur dans lequel le système sujet de la conception sera implanté et installé. Sur chaque poste nous avons observé et analysé les conditions de travail en comparaison à l'évaluation des postes dans le document unique.
- Seul l'opérateur du poste a la connaissance du travail réel, sa participation active est la clé principale de la réussite de la démarche.
- L'observation des postes de travail et surtout le dialogue avec les opérateurs est donc un caractère indispensable.
- Ils permettent de prendre en compte le travail réel des opérateurs, de visualiser, d'objectiver et d'évaluer les risques.

Les risques significatifs et intolérants identifiés sont présentés dans le tableau 1. Afin de respecter la confidentialité imposée par l'entreprise partenaire, deux postes seulement sont considérés dans le tableau 1.

	Risques Significatifs
Débit matière	Ambiance thermique
	Bruit
	Energie
	Incendie explosions
	Contact avec d'autre opérateurs
	Postures contraignante
	Conduite d'engins
	Vibration mécanique
	Manutention manuelle
Usinage	Bruit
	Postures pénibles
	Manutention manuelle
	Organisation de travail
	Intervention extérieures
	Vibrations
	Agents chimiques dangereux

Tableau 1 : les risques identifiés

En comparaison avec les facteurs de pénibilité, il en ressort les risques suivants (tableau 2):

Ateliers	**Risques concernés par la pénibilité**
Débit matière	Bruit
	Vibration mécanique
	Manutention manuelle
	Postures contraignantes
Usinage	Bruit
	Vibration mécanique
	Manutention manuelle
	Agents chimiques dangereux
	Postures contraignantes

Tableau 2 : les risques liées à la pénibilité

Dans la suite, nous limitons nos observations aux facteurs liées à la pénibilités apparus en 2016. Dans l'entreprise partenaire seulement les facteurs suivants sont identifiés. Les autres facteurs n'existent pas dans cette entreprise. Par exemple il n'y a qu'une seule équipe de travail et pas de travail de nuit.

3.1 Observation par facteur de pénibilité lors de débit matières:

Le débit matière sert à réceptionner, stocker et débiter de la matière soit pour les sous-traitants, soit pour les ordres de fabrication en interne. Les facteurs de pénibilité suivants sont observés :
1- Bruit : Les sources de bruit sont les scies et la machine qui fabrique des lames de perforation. Les équipements de protection individuelle pour diminuer l'exposition au bruit sont les bouchons d'oreilles.
2 Vibration : L'exposition aux vibrations viennent de la scie manuelle mais rarement en contact lors de la coupe.
3 Manutention manuelle : Lors du transport de la matière vers une palette d'expédition ou vers la scie,

l'opérateur doit pousser les longues tiges de matériaux sur le chariot élévateur qui n'est pas très adapté pour la tâche, car le déplacement de celui-ci n'est pas facile. Pour la poussée de la matière sur le convoyeur, cela est très difficile par le mauvais état du convoyeur (certains rouleaux ne tournent plus, diamètres différents).

4 Postures pénibles : Présence lors de la poussée de la matière sur le convoyeur car très haut par rapport à l'utilisateur.

3.2 Observation par facteur de pénibilité dans l'atelier Usinage :

Dans l'ateliers d'usinage nous avons observé certains facteurs identiques à ceux observé dans le débit-matière mais qui n'ont pas les mêmes origines et leurs évaluations sont différentes :

1- Bruit : La combinaison des machines en marche présente une exposition élevée, au point d'élever la voix pour parler à une personne à un mètre de distance. Des équipements de protection individuelle : bouchon d'oreille, sont présents.
2- Postures pénibles : La matière est entreposée sur des chariots à une hauteur proche du sol, l'opérateur doit se courber pour prendre les pièces et certains outils de mesures sont placés en hauteur ce qui implique des positions contraignantes.
3- Manutention manuelle : Le port de charges s'effectue régulièrement du chariot vers le poste de travail. Pour les pièces très lourdes, un pont électrique est à disposition pour les déplacer. La manutention est également présente lors du changement d'outils.
4- Vibration : Les sources de vibration auquel peut être exposé l'opérateur sont toutes les machines qui fonctionnent dans l'ateliers.
5- Les agents chimiques dangereux : Les produits auxquels les opérateurs sont le plus exposés sont les huiles de coupe et quelques colles pour la rectification que l'on identifiera par la suite.

4 EVALUATION DES RISQUES LIES DE PENIBILITE

Pour pouvoir évaluer la pénibilité par facteurs, il est nécessaire de mettre en place des outils permettant de récolter les données et les comparer aux seuils d'exposition. Dans la suite, nous détaillons l'évaluation réalisé pour chaque facteur.

4.1 Evaluation de Bruits

Il faut rappeler que le seuil d'exposition est fixé par les normes à 81 décibels(A) sur une période de référence de 8h soit à un nombre de 120 « chocs » par an à 135 décibels(C).
L'article R. 4431-2 du Code du travail interdit aux entreprises d'exposer les salariés à plus de 87 dB(A).
Ainsi pour analyser et diagnostiquer l'exposition à la pénibilité un logigramme permet d'exclure ou non le facteur pour chaque poste (Figure 2).



Figure 2 : Logigramme pour le facteur Bruit

Dès que l'environnement est observé comme bruyant, il faut procéder à une quantification de l'intensité sonore. Les instruments les plus souvent utilisés pour mesurer le bruit sont les sonomètres, l'audiodosimètre et le sonomètre intégrateur. Ici nous avons décidé de connaitre l'exposition personnelle au bruit. Pour évaluer le bruit et récolter les données nécessaires, nous avons utilisé un exposimètre pour mesurer l'intensité perçue par l'opérateur. Il est plus précis pour mesurer l'exposition personnelle au bruit sachant que les opérateurs se déplacent beaucoup, Il est nécessaire de cartographier l'atelier de production dans son ensemble pour avoir des données utilisables dans le temps s'il n'y a pas de modification de l'emplacement des postes.
Les mesures sont réalisées et ensuite comparées aux valeurs seuils fixées par la réglementation.

4.2 Evaluer les agents chimiques dangereux

L'évaluation des risques chimiques a nécessité une grande investigation avec la recherche d'un moyen d'évaluer et de standardiser une démarche avec les produits chimiques. L'évaluation est basée sur la méthode ND 2233 et constitue un langage commun pour les médecins, la CARSAT, et l'inspection du travail.
Les étapes suivies pour l'évaluation de ce facteur sont les suivantes :

1. Inventaire des produits utilisés et leur localisation dans l'ateliers, poste de travail et tâche.
   a. Renseigner tous les produits dans le logiciel choisi avec leurs mentions de danger.
   b. Enquête sur l'utilisation par les opérateurs.

2. Confrontation au données de l'ERP pour connaitre les quantités utilisées et faire le lien avec les codes articles de commande.
3. Sortir les produits chimiques contenant les mentions de danger rentrant dans la réglementation de la pénibilité.
4. Evaluer la durée d'exposition pour les produits concernés et les comparer aux seuils d'exposition.

Les produits visés sont les agents chimiques dangereux étiquetés, ou émis dans le cadre de procédés (soudage, ponçage). Pour ressortir les produits dits éligibles à la pénibilité, nous avons procédé par effet d'entonnoir. Les produits avec les mentions de pénibilité sont identifiés et l'inventaire et la classification par poste de travail et par machines a permis de les localiser. Une fois les produits concernés repérés, nous avons quantifié la durée d'exposition pour chaque opérateur (les moments d'utilisation, la durée et la fréquence de chaque exposition). En chronométrant les opérateurs travaillant dans la cabine de peinture nous avons obtenu une durée d'exposition supérieure au seuil réglementaire de 150 heures/an. Les produits dépassants les seuils sont identifiés. Ces produits sont utilisés pour plusieurs tâches ce qui multiple le temps total d'exposition.
Nous obtenons les durées d'exposition suivantes par peintre (Tableau 3) :

	Cabine ouverte Heure/an	**Cabine fermée Heure/an**
Produit 1	125,32	68,17
produit 2	323,76	131,76
Durcisseur 1	131,95 Heures / an	
Mélange 1	73,8 Heures / an	
Base universel	7 Heures / an	

Tableau 3 : Temps d'exposition au produit chimiques.

Pour les produits dépassant les seuils, des moyens de prévention des risques devraient être pris en compte.
Des équipements de protection individuelle sont obligatoires afin que l'opérateur soit le moins exposé tel qu'un scaphandre et une combinaison spécifique à la peinture.
Pour chacun de ces produits, il faut diminuer les conditions d'exposition et améliorer la prévention par la reconception des systèmes.

4.3 Evaluation les vibrations mécaniques

La réforme de 2016 impose de cumuler les niveaux de vibration transmis aux mains et aux bras avec celles transmises à l'ensemble du corps et de le comparer à un seuil de 450 heures par an.
Après identification préalable des postes exposés aux vibrations, nous avons remarqué rapidement que la plupart des machines dépassent le seuil de 2.5 m/s² pour les vibrations ressenties aux mains et aux bras, où l'usinage présente la plus grande exposition par rapport aux autres postes.
Pour évaluer ce facteur nous avons suivi la même démarche en identifiant les postes qui causent des vibrations. Ensuite il était nécessaire de déterminer les durées d'exposition et de comparer le résultat aux seuils d'exposition. Nous avons relevé la durée d'exposition en chronométrant les temps des tâches réalisés par les différents opérateurs. Les mesures sont faites sur une semaine de travail normal (pas trop chargé et sans chômage technique). La durée maximale par jour est de 23 minutes ce qui représente 15% du temps sur un temps de travail de 8h30.
La durée globale d'utilisation de certaines machines ne dépasse pas les seuils par personne exposée parce que plusieurs personnes l'utilisent.

En heure	**Chariot Magasin**	**Chariot Montage**	**Usinage**
Moyennes/J	1,26	0,18	0,16
Cumul prévisionnel/an	285,51	39,54	35,12
Max	1,90	0,53	0,31
Min	0,50	0,01	0,00

Tableau 3 : Durée d'utilisation globale

5 DISCUSSION

Notre objectif est d'identifier grâce à cette étude de terrain les données, paramètres, facteurs, etc. nécessaires à la prise en compte de la pénibilité dès la phase de conception. Les données récoltées lors de cette étude de terrain sont plus riches que celles prises en compte dans la méthode proposée par Sun et al. 2018. En effet, Sun a focalisé sa méthode sur les données des tâches à faire par les utilisateurs qu'il les a jugées nécessaires pour définir comment seront réalisées les foncions demandées par le client et celles nécessaires pour une utilisation sûre d'un produit. Il a pris en compte les facteurs : la durée de la tâche, qui fait la tâche (machine ou opérateur), la position dans les procédures d'utilisation ainsi que la structure de la tâche. Or une tâche peut être décomposée en sous-tâches jusqu'à un niveau élémentaire.
Par contre, les données de terrain ont permis de constater le besoin de connaitre la nature des matières traitées (chimique, bois, métaux, etc.) mais aussi la dimension de l'organisation de travail (même tâche réalisable par un seul opérateur peut être répartie sur plusieurs opérateurs et en plusieurs fois).
Aussi, la dimension des seuils imposées par les législations sont peu pris en compte dans la méthode proposée. En effet, les notions d'estimation de risques se basent sur le produit d'un indicateur de risque calculé en fonction de phénomènes dangereux, temps d'exposition, fréquence d'exposition et la gravité (Coulibaly et al. 2016). C'est-à-dire à la place de chercher à changer, lors de la conception, la solution technique fonctionnelle par une autre (qui peut-être plus chère pour minimiser, comme par exemple, la vibration), le concepteur pourrait garder la première solution trop vibrante en automatisant une partie des tâches manuelles et par conséquent minimiser le temps d'exposition. Il pourrait aussi préciser dans les documents fournis au client utilisateur qu'il faut éviter qu'un seul opérateur travaille tout le temps sur cette ma-

chine mais qu'il serait bien d'alterner deux opérateurs dans l'année.

6 CONCLUSION

Nous pouvons constater que l'intégration des facteurs humains dans la conception de produits, machines, systèmes est devenue une obligation et que les méthodes proposées sont en amélioration permanente pour respecter les réglementations mais aussi plus aller plus loin que les normes. Dans cet article, nous avons tout d'abord défini le cadre de ces travaux par l'évaluation de la pénibilité pour respecter le code du travail afin de pouvoir l'estimer dès la phase de conception. Pour cela nous avons basé le travail sur une méthode proposée dans la littérature pour déterminer les données à chercher sur le terrain mais aussi pour les compléter par des données constatées sur le terrain et potentiellement intégrables dans la conception des systèmes similaires futurs. Ces travaux ont montré que la méthode prend en compte la plupart des données et des informations utilisées par les utilisateurs concernant la pénibilité de travail dont les facteurs ont changé récemment. Mais nous avons constaté que la prise en compte des matières utilisées et de l'organisation de travail dans la conception est possible et rend le respect des normes plus facile. Dans les futurs travaux, d'autres domaines seront analysés dans d'autres contexte d'utilisation pour proposer une démarche globale et plus complète afin d'alimenter les concepteurs par des données de terrain liées à la législation mais aussi des procédures d'utilisation de leur produits chez les clients utilisateurs.

REFERENCES

Coulibaly A., R. Houssin, B. Mutel, 2008, Maintainability and safety indicators at design stage for mechanical products, *Computers in Industry*, 59(5) : 438-449. Doi/abs/10.1142/S0219686709001638

Directive 2006/42/CE : 9.6.2006, Official Journal of the European Union, L157/24, Directive 2006/42/EC of the european parliament and of the council of 17 may 2006.

Falck, A.-C., Rosenqvist M.: What are the obstacles and needs of proactive ergonomics measures at early product development stages? An interview study in five Swedish companies. International Journal of Industrial Ergonomics 42(5), pp. 406-415 (2012).

Feno, M.R., Martin, P., Daille-Lefevre, B., Etienne A. Marsot J., Siadat A.. (2018), « Safety of machinery: requirement specification based on functional need and work situations analysis", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* Vol 12 / 3, pp.943-953.

de Galvez, N., Marsot, J. ,Martin, P. , Siadat, A. , Etienne, A., (2017) EZID: A new approach to hazard identification during the design process by analysing energy transfers , *Safety Science,* 95 , pp. 1–14, Elsevier 2017

Ghemrahoui R., Mathieu L ., Tricot N. (2009) : "Design method for systematic safety integration", CIRP Annals - Manufacturing Technology 58: 161-164,

Haslegrave C. M., Holmes K.: Integrating ergonomics and engineering in the technical design process. Applied Ergonomics 25, pp.211–220,(1994).

Hoyos-Ruiz J., Martínez-Cadavid J.F., Osorio-Gómez G., Mejía-Gutiérrez R., (2017) "Implementation of ergonomic aspects throughout the engineering design process: Human-Artefact-Context analysis" International Journal on Interactive Design and Manufacturing, May 2017, Vol 11/2, pp 263–277

Martin P., Marsot J., Daille-Lefevre B., Godot X., Abba G., Siadat A., Gomez-Echeverri J.C., (2019), New issues for workers safety in the factory of the future", *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II*, Editors: Cavas Martinez et al. DOI 10.1007/978-3-030-12346-8-Engineering, pp. 402-411

NF EN ISO 12100: Safety of machinery: General principles for design, Risk assessment and risk reduction, CEN, Bruxelles, 93p, (2010).

Norman Donald, A. 1988. *The psychology of everyday things*. Basic books, ISBN 978-0-465-06710-7.

Pahl, G., & Beitz, W. 1996. *Introduction. In Engineering Design* (pp. 1-25). Springer London.

Redström, J. 2006. Towards user design? On the shift from object to user as the subject of design. *Design studies*, 27(2), 123-139.

Rouse, W. B., & Cody, W. J. 1988. On the design of man-machine systems principles, practices and prospects. Automatica, 24(2), 227-238.

Sadeghi, L., Dantan, J. Y., Siadat, A., & Marsot, J. 2016. Design for human safety in manufacturing systems: applications of design theories, methodologies, tools and techniques. *Journal of engineering design*, 27(12), 844-877

Sun, X., Rémy Houssin, Renaud, J., and Gardoni, M. 2019. "A review of methodologies for integrating human factors and ergonomics in engineering design." *International Journal of Production Research*, Volume 57, 2019 - Issue 15-16, ISSN: 1366-588X.

Sun, X., Houssin, R., Renaud, J., & Gardoni, M. 2018. Towards a human factors and ergonomics integration framework in the early product design phase: Function-Task-Behaviour. International Journal of Production Research, 7543, pp. 1–13.

Zhou, D., Chen, J., Lv, C., & Cao, Q. 2016. A method for integrating ergonomics analysis into maintainability design in a virtual environment. International Journal of Industrial Ergonomics, 54, pp.154-163

DOMICILE DU FUTUR 4.0 POUR PERSONNES ATTEINTES DE DEBUT DE TROUBLES NEURODEGENERATIFS MAJEURS, TNM

JEAN RENAUD

ICube, UMR-7357, Strasbourg 67, France
ÉTS, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal (QC) Canada
jean.renaud@insa-strasbourg.fr

REMY HOUSSIN

ICube, UMR-7357, Strasbourg 67, France
remy.houssin@insa-strasbourg.fr

MICKAËL GARDONI

ÉTS, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal (QC) Canada
mickael.gardoni@etsmtl.ca

SYLVAINE RENAUD

Administratrice Fédération ADMR-54 et SSIAD, SAAD Blainville sur l'eau
sylvainerenaud@yahoo.fr

RESUME : *Avec le vieillissement de la population, les personnes âgées souhaitent de plus en plus vieillir à domicile et retarder au maximum leur entrée en structure, type EHPAD ou Hôpital. Les raisons peuvent être multiples comme le coût d'entrée, le côté impersonnel et le manque de sollicitation. L'isolement et le manque d'identité sont également des éléments qui peuvent retarder l'entrée en structure de la personne âgée. Enfin, une nouvelle génération de seniors, les boomers veulent conserver leur liberté de choix et rester libre à domicile !*

Dans le cadre de notre étude, nous souhaitons nous intéresser plus particulièrement aux personnes atteintes de début de troubles neurodégénératifs majeurs (TNM) qui souhaitent rester à domicile le plus longtemps possible. Ces troubles sont de plus en plus présents avec le vieillissement de la population et suite à la période de pandémie COVID-19, d'où l'intérêt de réfléchir sur le domicile du futur 4.0 permettant aux résidents de vivre leurs activités de la vie quotidienne (AVQ). Les nouvelles technologies, le numérique, la téléconsultation, la domotique… et les objets connectés (IOT – Internet of Things) peuvent être des solutions potentielles à la conception du domicile du futur 4.0.

MOTS-CLES : *Usage, Multi-user, Contradiction, Design.*

1 INTRODUCTION

Dans les dix ans à venir, le visage sociologique de la société française aura évoluée en raison du vieillissement de la population et de l'arrivée des générations des boomers (Delaunnay, 2019). Les personnes de plus de 60 ans représenteront le tiers de la population en 2040 (Renaud, Rioux, 2016). Les personnes vont vivre plus longtemps mais avec l'apparition de nouvelles pathologies, comme les troubles neurodégénératifs majeurs TNM, de type Alzheimer, Parkinson, Corps de Lewis, les démences vasculaires (HAS, 2011) … Ces pathologies différent des des autres comme les difficultés de mobilité ou autres handicaps physiques. Les pathologies neurologiques auront un effet sur les personnes restant à domicile, sur le niveau d'autonomie, sur leur possibilité de poursuivre leurs activités de la vie quotidienne, appelées AVQ.

Les personnes affectées par cette pathologie ont également un impact sur le proche-aidant (Renaud et al, 2016). Celui-ci s'épuise, se fatigue et déprime. D'où, une recherche de la prise en charge de ces personnes fragilisées à domicile. L'intérêt de ce travail de recherche est d'adapter le futur domicile à cette nouvelle situation en intégrant la dimension numérique, les objets connectés (IOT), la domotique, les capeurs intelligents, les robots… que nous appelerons : domicile du futur 4.0 (Renaud et al, 2019) (Tisseron, Tordo,2018) (Nordlinger, Villani, 2018).

2 DOMICILE DU FUTUR 4.0

2.1 Situation actuelle du domicile

Actuellement, les seniors souhaitent rester à domicile le plus longtemps, seul(e)s ou entouré(e)s, pour retarder le moment d'entrer en structure (Maison de retraite, résidences-seniors ou EHPAD). Alors, les futurs résidents de leur domicile ne manquent pas d'innovation ou font preuve de prospective. Ils commencent à modifier leur maison ou appartement en modifiant la salle de bain (plain-pied) à leur future pathologie, en supprimant leur chambre à l'étage, en réalisant des maisons de plain-pied, en revendant leur maison pour une plus fonctionnelle et adaptée à leur vieillissement.

En résumé, ils anticipent la manière dont ils vont vieillir, l'apparition de leur handicap… en aménageant

leur domicile. Ils veulent garder le choix du comment bien vieillir. Dans le cadre de ces travaux, il s'agit de démontrer que cette façon de préparer sa vieillesse en restant à domicile le plus longtemps possible peut être repenser autrement. Il s'agit de replacer l'utilisateur, le résident du futur domicile dans le cadre de ses besoins immédiats et d'imaginer le domicile du futur en recherchant ses fonctionnalités, l'usabilité, la désirabilité, l'accessibilité (Sun et al, 2013)…

Le futur résident du domicile 4.0 peut occuper différentes formes d'utilisateurs du domicile selon ses fonctions, comme l'aide-soignante, l'infirmière, le médecin de famille, les voisins, le proche-aidant…

2.2 Analyse du domicile actuel

Afin de réfléchir sur le domicile du futur 4.0, nous proposons, dans un premier temps de faire un état des forces et faiblesses du domicile actuel, d'une manière générale, et de ses menaces et opportunités à partir de la grille SWOT[1] (*Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces*). Cette évaluation va permettre de mieux connaître l'intérêt du futur domicile, ses atouts ou opportunités, ses marges de progression et ses menaces. A partir d'un travail de groupe composé d'Aide-Soignantes et d'étudiantes AS, une synthèse est proposée tableau 1.

FORCES	FAIBLESSES
- Continuer à avoir ses habitudes à domicile et ses activités (AVQ) - Lien social avec ses amis et ou ses voisins - Le résident n'est pas désorienté - Le budget est moindre par rapport au placement - Garder ses repères vis à vis de l'entourage, voisins, amis...	- Le résident est seul avec une pathologie évolutive et avec des risques de sécurité - La surveillance est moindre ou partielle - Temps long avant l'arrivée des secours - La surveillance n'est pas continue - Isolement du résident, l'anonymat,pas de lien social - Non régularité des besoins - Pas d'alerte si problème (chutes, mouvements…)
OPPORTUNITES	**MENACES**
- Les AVQ[2] ne sont pas stoppées, mais actives par stimulation cognitive - Le résident "EXISTE", a une identité - Les effets de la maladie peuvent être retardés - Libérer des places en structures	- Maisons de seniors se développent… - Pas les moyens financiers pour rénover ou actualiser le domicile - Le résident est SEUL à domicile

Tableau 1 : Grille SWOT du domicile actuel

[1]. Matrice SWOT, *Strengths (*forces), *Weaknesses* (faiblesses), *Opportunities* (opportunités), *Threats* (menaces) ou (Forces - Faiblesses - Opportunités - Menaces) ou AFOM.

[2]. AVQ Activités de la Vie Quotidienne

2.3 Réflexion du domicile du futur 4.0 (D4.0)

Les objets connectés, automatisés vont prendre plus de place dans les différents projets, et particulièrement dans ce domicile du futur 4.0 (Acas, 2016). Il ne s'agit pas de mettre en place un environnement hyper connecté mais de partir d'un bilan d'autonomie du résident et d'évaluer ses besoins en qualité "d'utilisateur" de ses activités au quotidien afin d'évaluer ses besoins d'autonomie nécessaires (Salles et al, 2017).

Le domicile rénové, relooké ne consiste pas uniquement au résident à vivre sa vie d'une manière "assistée" mais d'être acteur de celle-ci, de ses handicaps et degré d'autonomie. Le domicile ne doit pas uniquement être un lieu de vie mais également un lieu où la stimulation cognitive ou autres formes de stimulation font partie des activités quotidiennes (Belliès, Jourdan, 1997).

Le type de domicile que nous voulons imaginer consiste au résident de pouvoir continuer à être dans une pratique de stimulation des activités de la vie quotidienne (AVQ) en toute sécurité dans un cadre où le lien social est sauvegardé. Passer du besoin du client à l'expertise de l'utilisateur. Le résident du domicile n'est plus un client qui attend un service en contrepartie d'un payement de ce service, mais un "Utilisateur expert" qui connaît sa pathologie ou au travers du proche-aidant. Le proche-aidant change de rôle, il ne doit plus subir les effets de la maladie mais doit les anticiper. Il a un rôle d'expert et doit former un couple dynamique Proche-Aidant expert-Aidé. Le corps médical n'apporte pas uniquement un soin, un service ciblé, mais doit accompagner le résident dans ses activités de la vie quotidienne.

Enfin, le domicile du futur devra être branché, connecté, muni de OIT, de WIFI, téléconsultation… pour ne pas se marginaliser par rapport à l'évolution des technologies (Tsai, Zhang, 2016) (Rossey et al, 2016) (Lacroix, 2017) (Gruson, 2018).

2.4 Qu'est-ce qu'une personne âgée

La personne âgée est appelée senior ou aîné. Le vieillissement est un processus progressif. Edgar Morin parle de continuum de l'âge et Serge Guérin, sociologue français, insiste sur le fait que l'âge est un « construit social » qui évolue en fonction des normes que se donne la société. Pour lui l'âge a « rajeuni » du fait de l'augmentation de l'espérance de vie et de l'amélioration de la santé et de la formation des plus de 60 ans. Avec l'arrivée des « seniors boomers », les lois du veillissement vont être bousculées. On va passer du mourir à domicile à « *bien vieillir à domicile* ».

2.5 Objectifs et résultats attendus du D4.0

Il ne s'agit pas de rénover le domicile existant pour suppléer les handicaps du résident face à son vieillisse-

ment, mais de l'adapter afin de retarder sa perte d'autonomie et d'augmenter son espérance de vie à domicile le plus longtemps possible (Maguire, 2014).

Ce futur domicile s'inscrira dans une démarche de stimulation continue des activités de la vie quotidienne à partir d'un programme d'activités adapté à la loi ASV[3] (Loi ASV, 2015). Ce domicile doit continuer à favoriser une vie sociale adaptée, voire repensée au résident. Ce projet du domicile du futur devra également prendre en compte les risques encourus pour le résident et devra également mettre en place des indicateurs de suivi pour évaluer la pertinence du domicile du futur dans l'accompagnement du résident à domicile.

3 UTILISATEUR EXPERIENCE (UX)

3.1 Innover en « Design Thinking »

Le design thinking « penser le design », en français démarche de conception créative, est une méthode de gestion de l'innovation élaborée à l'université Stanford aux États-Unis dans les années 1980 par Rolf Faste.

Le design thinking a pour but de répondre à un besoin, qu'il soit ou non explicite en plaçant l'utilisateur en immersion et en pratiquant la co-construction avec l'utilisateur. Le design thinking implique des personnes n'ayant pas les mêmes expertises, les mêmes habitudes de travail ni les mêmes manières de travailler. Ce qui favorise l'intelligence collective de façon très concrète.

Le design thinking prend en compte la pensée analytique et la pensée intuitive, dans une démarche globale et non linéaire, appelée design collaboratif. Les retours de l'utilisateur final sont étudiés dans la construction du besoin.

Dans ce travail de recherche, il s'agit de mieux cerner les "formes d'utilisateur" et de prendre en compte non seulement son besoin d'une manière ponctuelle à un instant (t) ou d'une manière continue, mais son expérience. La conception ou l'innovation ne doit plus uniquement apporter une réponse fonctionnelle au besoin du client mais proposer un désir ou une émotion à l'utilisateur final (Ullman, 2010).

3.2 Définition Utilisateur Experience (UX)

Depuis ces dernières années, certains auteurs se sont intéressés sur l'expérience de l'utilisateur, appelée : « *user experience (UX)* ». Cela se réfère à l'expérience d'une personne utilisant un produit, un système ou un service particulier. Il s'agit de rendre un produit, un système facile d'utilisation, compréhensible immédiatement, ergonomique, logique…. par l'intégration de l'expérience, la motivation, le désir de l'utilisateur dans la conception de produit.

Dans la continuité de l'explication de l'utilisateur, les études de conception doivent être capables d'identifier ou de recenser les différents utilisateurs selon le cycle de vie du produit que nous nommerons « Profil d'utilisateur ». Il n'est pas rare de constater que le produit en phase de fonctionnement dispose de plusieurs profils d'utilisateurs.

En quelque sorte, il s'agit de recenser les « personae » afin d'adapter le produit ou le système aux spécificités au profil type d'utilisateur (HAS, 2013).

Par la suite, le concepteur devra hiérarchiser ces profils d'utilisateurs, mieux cerner les fonctionnalités du produit selon le type d'utilisateur. L'analyse fonctionnelle permet d'y répondre en partie.

3.3 Différents profils d'Utilisateurs (UX)

Analyser un besoin, c'est traduire le produit en « cahier des charges Client » ou en « cahier des charges Utilisateur ». Le « client utilisateur » raisonne en solutions plutôt qu'en besoins. Lorsqu'il y a plusieurs utilisateurs, on parle de multi-utilisateurs. La démarche de l'analyse fonctionnelle est une réponse à la recherche des besoins des utilisateurs. Dans notre étude du domicile du futur, nous recherchons les différents types d'utilisateurs ou d'usages du produit.

TYPE (UX)	UX_i	UTILISATEUR EXPERIENCE	ACTIVITES
Résident à domicile (Utilisateurs)	UX_1	Cuisinier	Activités culinaires, vaisselle, mettre la table…
	UX_2	Jardinier	Jardinage, plantation, arrosage…
	UX_3	Agent de ménage	Mettre la table, vaisselle…
Aide-Soignante	UX_4	Nursing	Toilette, hygiene, toilettes…
Personnel de soin	UX_5	Orthophoniste, Kinésithérapeute…	Stimuler les manques d'autonomie
Infirmière et/ou médecin	UX_6	Suivi médical, prise des médicaments	Administrer des médicaments, réalise des soins
Résident	UX_7	Hygiène à la personne	Toillette, se coiffer, se maquiller…
Agent de sécurité	UX_8	Système de sécurité	Mise sous alarme
Résident	UX_9	Diverstissement	Travaux manuels, jeux, chants, dessin…
Résident	UX_{10}	Systèmes de mobilité	Se déplacer, se mouvoir…
Parents, voisins Ami(e)s	UX_{11}	Convivialité, lien social,	Moments de partage, thé, sorties…
Résident	UX_{12}	" Sportif "	Activités physiques
Parenté, famille	UX_{13}	Tuteur juridique, curatelle…	Garant vis à vis des institutions

Tableau 2 : Liste des différents utilisateurs (UX_i)

[3]. Loi 2015 sur l'Adaptation de la Société au Vieillissement.

4 ANALYSE FONCTIONNELLE

4.1 Etude de besoin

Une étude de besoin pour ce domicile 4.0 s'avère nécessaire afin de connaître plus exactement le besoin de ce nouveau domicile. Nous proposons d'utiliser l'outil d'étude besoin de l'analyse fonctionnelle proposé par le cabinet APTE. Deux questions à poser afin de défnir le but ou l'objectif de ce domicile du futur 4.0.

- *A qui, à quoi ça rend service ?*
- *Sur qui, sur quoi ça agit ?*
- *Enfin, dans quel but ou objectif*

Nous présentons ci-dessous un résultat synthétique de l'étude du besoin de ce domicile du futur 4.0 en utilisation l'outil du cabinet APTE.

A qui, à quoi ça rend service ?	Aux personnes atteintes de TNM qui désirent rester à domicile, Aux proches-aidants, couple dynamique « Aidant – Aidant », Aux acteurs médico-social…
Sur qui, sur quoi ça agit ?	Stimulation des activités des activités de la vie quotidienne (AVQ), Programmes individualisés, qualité de vie, les informations, objets connectés…
Dans quel but ou objectif ?	Permettre aux personnes atteints de début de TNM de rester à leur domicile adapté à leur pathologie le plus longtemps possible.
Pourquoi ce besoin existe ? (but, raison)	Une nouvelle génération va vieillir. Elle souhaite rester à domicile pour vivre sa 4ème vie ! Les EHPAD ne répondent pas à cette nouvelle pathologie. Minimiser la charge des aidants. Minimiser l'occupation des structures
Qu'est ce qui pourrait le faire disparaître ? ou le faire évoluer ?	Un remède, un médicament… qui soignent ces pathologies des troubles de la mémoire… Les futurs seniors ne désirent pas rester à domicile.
Quel est le risque de le voir disparaître ?	A ce jour, aucun signe positif apparaît comme une solution pour lutter contre ces pathologies ou le fait de ne pas rester à domicile !

Tableau 3 : Etude de besoin du futur domicile 4.0

4.2 Organisation du domicile 4.0

Selon la figure 1, ci-dessous, on résume l'ensemble des composantes du domicile du futur permettant au résident de rester à domicile le plus longtemps possible.

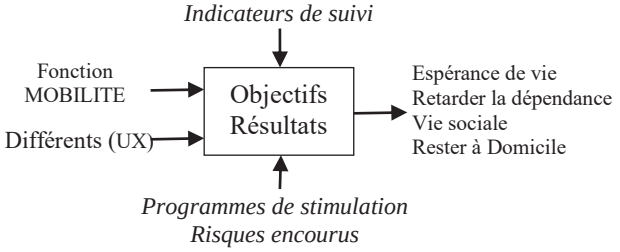


Figure 1 : schématisation du D4.0

4.3 Analyse fonctionnelle

- Recherche des milieux extérieurs

M_p	Type de milieu Extérieur	Description des milieux extérieurs
M_1	Matériel de cuisine	Ustensiles permettant de faire la cuisine…
M_2	Matériel de jardinage	Pots de fleurs, ustensiles, semences
M_3	Système de mobilité	Escalier, déambulateur, canne…
M_4	Résident à domicile	Personne atteinte de début de Troubles Neuro-dégénératifs
M_5	Equipe d'aide (AS, ASG, AD)	Aide-soignante, ASG, AD …
M_6	Moyens de sécurité	Alarme, clés, digicode
M_7	Infirmier, médecin...	Corps médical
M_8	Orthophoniste, kinésithérapeute	Personnel spécialisé dans le soin
M_9	Matériel d'hygiène à la personne	Peigne, brosse à cheveux, crème…
M_{10}	Matériel d'entretien et d'hygiène	Eponge, balai, lave glace, balayette, produits d'entretien
M_{11}	Système de divertissement	Télévision, jeux, livres…
M_{12}	Parents, voisins…	Durée, dates, qui ? …

Tableau 4 : Liste des milieux extérieurs M_p

**accompagnement (Aide-soignante, Auxiliaire de vie…)*

***kinésithérapeute*

- Fonctions de service et fonctions de contraintes

F_{Sj} / F_{Ck}	DESCRIPTION DES FONCTIONS	CRITERES C_j	C_j
Fs_1	Le D4.0 doit permettre au résident d'être mobile en toute sécurité	Type Mobilité Type Materiel	C_1 C_2
F_{S2}	Le D4.0 doit permettre au résident de prendre soin de son hygiène	Type de soin Type Matériel	C_3 C_4
Fs_3	Le D4.0 doit permettre au résident de disposer du materiel de cuisine pour ses activités culinaires en toute sécurité	Type Matériel Type d'Activité	C_5 C_6
Fs_4	Le D4.0 doit accueillir le personnel médico-social (AS, ASG, AD...)	Type d'aide Type d'accueil	C_7 C_8
F_{S5}	Le D4.0 doit permettre d'accueillir des kinésithérapeute, orthophoniste ou autres	Quand Comment	C_9 C_{10}
F_{S6}	Le D4.0 doit être adapté pour un suivi médical par les Médecins, infirmières…	Type de suivi Type de soin	C_{11} C_{12}
F_{S7}	Le D4.0 doit pouvoir accueillir les parents, voisins, parents…	Type de visite	C_{13}
Fs_8	Le D4.0 doit permettre au résident de pratiquer des activités de jardinage en toute sécurité	Type d'activité Type de sécurité	C_{14} C_{15}
Fc_9	Le D4.0 doit intégrer les systèmes de mise en sécurité du domicile du resident	Systèmes Niveau	C_{16} C_{17}
Fs_{10}	Le D4.0 doit permettre au résident de continuer les activités d'entretien et d'hygiène	Type d'activités Entretien	C_{18} C_{19}
Fs_{11}	Le domicile 4.0 doit être doté de système de divertissement	Type autonomie Divertissement	C_{20} C_{21}

Tableau 5 : Liste des fonctions de service F_{Sj} et de contrainte F_{Ck}

							Activités de la vie quotidienne (stimulation)															
							Cuisine, repas, table…	Jardiner, planter, arroser…	Ménage, faire le lit, laver les sols, …	Aide à la toilette, aide aux repas…	Activités de soin, prises de médicaments, suivi	Contrôle médical, vaccination	Hygiène à la personne, toilette…	Systèmes de sécurité à la mobilité/aux activités	Systèmes de divertissement (jeux solitaire,…)	Aide à l'utilisation des systèmes de mobilité	Parents, proche aidants, voisins, amis…	Activités physiques (assouplissement,…)	Activités juridique, notarial,successions…	***Solutions, principes par fonction attendue***	
FS/FC	***Désignation le D4.0 doit***	***Critères (type de)***	***Cj***	***Niveaux Nk***	**Note**	**UX 1**	**U X2**	**UX 3**	**UX 4**	**UX 5**	**UX 6**	**UX 7**	**UX 8**	**UX 9**	**UX 10**	**UX 11**	**UX 12**	**UX 13**	***Concepts, principes***	***Quelques Exemples de solutions***
FS1	permettre au résident d'être mobile en toute sécurité	mobilité	C1	Autonome	**4**	x	x	x									x		Fauteuil connecté	Canne connectée ou intelligente
		matériel	C2	Sécurité du résident		x	x	x				x		x	x		x			Bracelets connectés, pilotage à distance
FS2	permettre au résident de prendre soin de son hygiène	soin	C3	toilette complète								x							SdB aménagée:connectée	Domotique, ergonomie…
		matériel	C4	de sécurité								x								Téléassistance
FS3	permettre au résident de disposer du matériel de cuisine	matériel	C5	Tout matériel pour cuisiner		x							x	x	x				Surveillance des aliments,…	Ustensiles connectés…
		activité	C6	Plats froids et ou chauds		x							x	x	x				Récipients connectés	Récipients connectés
FS4	permettre d'accueillir le personnel médico-social (AS, ASG, …)	aide	C7	Selon le d° autonomie					x			x							Applications dédiées	Contrôle du poids, glycémie, …
		accueil	C8	Accès à tout le matériel					x			x							Accès connectés	Caméras connectés, applications…
FS5	permettre d'accueillir des kinésithérapeute, orthophonistes…	Quand	C9	selon un échéancier						x		x							Planning connecté	
		intervention	C10	Exercices de base						x		x							Rythme connecté	Pédaliers connectés
FS6	être adapté pour un suivi médical par (infirmiers/médecins)	suivi	C11	en présentiel ou à distance						x	x	x							e-santé…	Pilluliers connectés, données partagées
		diagnostic	C12	Réalisé à domicile							x	x								Smartphone connecté, photophones
FS7	pouvoir accueillir les parents, voisins, proches aidants…	visite	C13	Uniquement identifiés												x			Principe de la domotique	Accès sécurisés et connectés
FS8	permettre de pratiquer des activités de jardinage en sécurité	activité	C14	de base en jardinage			x										x		Programme d'activités	Matériels de jardinage ergonomiques
		sécurité	C15	Protection adaptée			x										x		Sécurisation	
FS9	intégrer les systèmes de sécurité	systèmes	C16	Le plus adapté au domicile									x						Alarme à distance	Plateformes téléphoniques
		Technologie	C17	Maîtrisable par les acteurs									x							Programmation à distance
FS10	permettre de continuer les activités d'entretien et d'hygiène	activité	C18	Au maximum manuel				x												
		entretien	C19	de base pour l'entretien				x									x			
FS11	être doté de système de divertissement	autonomie	C20	Seul ou à plusieurs													x		Homme /machine	Jeux manuels, jeux connectés
		divertissement	C21	Manuel ou numérique															Deep learning	Bataille naval connecté
				Rapport avec une démarche non médicamenteuse de stimulation																
				Développement ou maintien de l'autonomie		x	x	x	x			x	x	x	x		x			
				Pratiques d'activités physiques			x	x												
				Stimulation des 4 A*																
				Stimulation intellectuelle		x	x	x												

Proposition de solutions / Utilisateur UX
Plan de travail connecté, appareils électriques, ergonomiques
Outils ergonomiques, non tranchants, planning des semis…
Appareils électriques (24V), balai, balayette accessibles,…
Dossier de suivi numérisé, mis à jour et accessible (RGPD)
Environnement d'hygiène à étudier, sécurisé, connecté…
Teléconsultation, télémédecine, Rapports entre Résident,…
toilette et lavabos ergonomiques, détecteur de chute,…
vêtements sécurisés, sols anti-dérapants,…
Tablettes numériques, Robot, jeux manuelsou numériques
Selon l'handicap, fauteuil roulant, canne… connectés
Accès sécurisés connectés: signal reconnaissable, caméra…
visites sécurisées, Vidéo numérisé, WIFI accessible
Personne de confiance, mise en tutelle, curatelle…

**4 A : Amnésie, Agnosie, Apraxie, Aphasie*

5 PROPOSITION D'EXEMPLES DE SOLUTIONS

Pour compléter notre travail de prospection sur le domicile du futur 4.0, nous utilisons le principe des **matrices QFD** (*Quality Function Deployment, Déploiement des Fonctions Qualités*). A partir des activités mises en œuvre pars les différents utilisateurs (UX_i) et les fonctionnalités attendues (FS_i / FC_k) du futur domicile 4.0, nous proposons des principes et concepts de solutions et des propositions de solutions ou des exemples de solutions, selon la figure 2.
C'est un document de travail qui présente un modèle global et général. Il peut s'enrichir au cours de nouvelles solutions connectées et qui peut se personnaliser en fonction du résident, de sa culture, de son domicile, de son degré d'autonomie et de son environnement.
A la lecture de cette grille, nous avons croisé les différentes fonctionnalités caractérisées du domicile, avec les différents "Utilisateur" afin de faire émerger les principes et concepts de solutions afin de faire émerger des propositions de solutions selon les Utilisateurs et les fonctions et critères. Un spectre de solutions connectées ou numériques est proposé au concepteur de ce nouveau domicile dans un cadre global de stimulation des (AVQ) du résident.

6 CONCLUSION

Ce papier de recherche avait pour but de proposer une démarche à la fois analytique dans le cadre de l'analyse fonctionnelle et intuitive dans la recherche de solutions ou de principe de solutions pour faciliter la conception du domicile 4.0. Nous avons identifié les fonctions nécessaires en se basant sur l'analyse des besoins de différents utilisateurs. Cette première approche se veut globale pour vérifier sa faisabilité de cette démarche. Dans un prochain travail de recherche, nous préciserons le "profil de résident" et sa pathologie associée, le type de domicile et son environnement, les différents acteurs ou utilisateurs (UX_i), afin de mieux de mieux adapter les programmes de stimulation du résident qui souhaite "bien vieillir" à domicile.

REFERENCES

Acas R, Barquissau E, Boulvert Y.M, Dosquet, E, Dosquet F, Pirotte J, *Objets connectés : la nouvelle révolution numérique, Editions Eni, (2016).*

Belliès, L., Jourdan, M., Le retour d'expérience : un outil pour aborder les questions organisationnelles. In Recherche, pratique, formation en ergonomie : évolutions et interactions dans le contexte social, économique et technique. Actes du XXXII° Congrès de la Self, pp. 159-170. Lyon, septembre, (1997).

Delaunay M, « Le fabuleux destin des baby-boomers », Edition PLON, 2019.

Gruson D, La machine, le médecin et moi, L'intelligence artificielle nous soigne déjà, Editions l'Observatoire, 2018.

HAS, Haute Autorité de santé, Maladie d'Alzheimer et maladies apparentées : diagnostic et prise en charge, Recommandations de bonnes pratiques, Décembre 2011.

HAS, Haute Autorité de santé, Plan Personnalisé de santé (PPS), les parcours de soins, juillet 2013, accessible sur www.has-sante.fr.

Lacroix J.M, La médecine formatée, Médecins et malades face aux nouvelles technologies, Ethique et pratique médicale, Editions L'Harmattan, 2017.

Loi du 28 décembre 2015, n° 2015 - 1776, ASV, loi d'adaptation de la société au vieillissement, accessible sur https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031700731

Maguire, M, Socio-technical systems and interaction design-21st century relevance, Applied Ergonomics, 45(2), p. 162-170, (2014).

Nordlinger B, Villani C, Santé et intelligence artificielle, Editions CNRS, 2018.

Renaud T, Rioux L, Portrait social, 2016, INSEE Références, Statistique publique, Edition 2016. Paragraphes 2.7, pp 158-159 (249 pages)

Renaud J, Nour N, Houssin R, Gardoni M, 2019, Rôle de l'aidant d'une personne atteinte de la maladie d'Alzheimer ou apparentée, à l'ère du numérique, La Revue de Gériatrie, 2019a, 44 (4) : 227-240.

Renaud J, Houssin R, Armaghan N, Gardoni M, « Future home 4.0 for people with major neurodegenerative disorders. Finding the contradictions ». The 19th TRIZ Future Conference, Marrakesh, Maroc, octobre 09-11, 2019b.

Rossey J, Moerman I, Demeester P, Hoebeke J, WI-FI helping out Bluetooth Smart for an improved home automation user experience, APCCAS, IEEE, 2016.

Sun, H., Houssin, R., Gardoni, M., de Bauvrond, F. Integration of user behaviour and product behaviour during the de sign phase: Software for behavioural design approach, International Journal of Industrial Ergonomics, 43(1), p. 100-114 (2013).

Salles N & all, Global geriatric evaluation is feasible during interactive telemedecine in nursing homes, European research in Medecine, Elsevier, Vol.6, pp. 59-65, 2017.

Tisseron S, Tordo F, Robots de nouveaux partenaires de soins psychiques, L'école des parents, Editions Erès, 2018.

Tsai T.H, Zhang K.L, Implementation of intelligent Home appliances based on IOT, APCCAS, pp.146-148, IEEE 2016.

Ullman, D., The Mechanical Design Process, Fourth Edition, in "Why Study the Design Process?", McGraw-Hill, New York, p. 2, (2010).

UN MODELE DE BLENDING POUR LA PLANIFICATION DYNAMIQUE D'UNE CHAINE LOGISTIQUE MINIERE

M. BAMOUMEN[a, b], V. HOVELAQUE[a, b], V. GIARD[a, c]

[a] Emines-Universite Mohammed VI Polytechnique, Benguerir, Maroc
[b] Univ-Rennes, CNRS, CREM - UMR 6211, F-35000 Rennes, France
[c] Paris-Dauphine, PSL Research University, 75016, Paris, France
{Mouna.Bamoumen, Vincent.Giard}@emines.um6p.ma, Vincent.Hovelaque@univ-rennes1.fr, Vincent.Giard@dauphine.psl.eu

RESUME : *Les différentes qualités de minerais de phosphate extraits (Inputs Primaires – IP) ne répondent pas aux spécifications de qualités marchandes requises (Output). Pour y parvenir, deux traitements sont généralement nécessaires : un mélange d'IP suivi d'un passage en laverie qui enrichit le mélange et en modifie la composition, plusieurs gammes étant possibles, avec des temps de changement de gamme significatifs. Sur le site minier de Khouribga, les laveries sont difficilement alimentées par des mélanges d'IP. Elles traitent donc en continu une succession des lots d'IP qui, en sortie, deviennent des lots d'Inputs Intermédiaires (II) acheminés par pipe vers une cuve de stockage avec des temps de transport significatifs. Le mélange obtenu par l'alimentation, pendant la même durée, de 5 lots d'II provenant des 5 laveries doit respecter les contraintes de composition de l'output commandé, avant expédition au client par pipe. Le modèle présenté vise à définir le programme synchronisé de prélèvements des IP et des gammes de laverie à utiliser, pour satisfaire un programme d'expédition d'outputs, tenant compte des temps d'acheminement et des disponibilités des IP. La modélisation de ce problème original de blending continu, non identifié dans la littérature, est quadratique. Un exemple réel de son utilisation est fourni.*

MOTS-CLES : *Modélisation des systèmes continus, Recherche opérationnelle, Gestion de production, Gestion de la qualité, Blending, Gammes alternatives.*

1 INTRODUCTION

Ce papier s'intéresse à une variante du classique problème de blending, rencontré sur le site de Khouribga de l'OCP (principale entreprise mondiale d'extraction du phosphate) décrit à la Figure 1 (qui fournit les principales caractéristiques du problème posé). Ce site a comme principal objectif d'alimenter les usines chimiques de l'OCP (client interne) et l'exportation (client externe) par des lots de produits (Outputs) fabriqués à partir de minerais et envoyés en continu par un pipeline long de 187 kms à partir d'une station de tête (ST) comportant deux cuves de 9000 m^3. Un output doit respecter des contraintes de composition, de type [Min-Max], portant sur un ensemble de composants chimiques. Les minerais extraits, qualifiés ici d'Inputs Primaires (IP), sont caractérisés par ces mêmes composants, mais vérifient rarement les contraintes de composition des outputs. La solution classique d'un blending à sec d'IP, avant éventuel traitement complémentaire en laverie, pour obtenir un output conforme (Azzamouri *et al*, 2020), n'est techniquement pas possible sur ce site de Khouribga, qui comporte cinq laveries, où une laverie est alimentée par une séquence de lots d'IP. Le passage en laverie d'un lot d'IP produit un lot d'input intermédiaire (II) de caractéristiques volumiques et de composition qui dépend du choix de l'une des trois gammes de lavage possibles. Le scénario de fonctionnement modélisé et illustré numériquement dans cet article se fonde sur le principe d'un mélange dans la ST de 5 lots d'II provenant simultanément des 5 laveries, ce mélange respectant les contraintes de composition du lot d'output demandé.

Le problème de blending étudié dans ce papier présente une originalité liée à la combinaison de plusieurs caractéristiques, à savoir : *i*) Les laveries traitent successivement des lots d'IP (pas de mélange en entrée de la laverie) ; *ii*) plusieurs gammes existent pour obtenir un lot d'II ; elles impactent à la fois la composition de l'II et la réduction de poids en sortie de laverie ; *iii*) le changement de gamme peut s'accompagner d'un temps de lancement qui stoppe la production de la laverie ; *iv*) les pipes d'alimentation de la ST contiennent des quantités d'II dépendant du débit et de l'éloignement de la laverie ; en conséquence, le programme de production d'II en laverie doit tenir compte de temps de transport pour assurer une alimentation synchronisée de la station de tête par les lots d'II en provenance des 5 laveries ; *v)* la production étant continue, il faut tenir compte de résidus présents dans les laveries (voir figure 1) lors du lancement en fabrication d'un nouvel II ; les commandes d'outputs portant sur des volumes supérieurs à la capacité de la cuve de la ST, (9000 m^3), chaque commande est scindée en deux commandes élémentaires, la première de 9000 m^3 et la seconde portant sur le volume résiduel ; la première commande élémentaire, va progressivement remplir une cuve vide en commençant par accueillir les résidus des II précédent présents dans les 5 laveries (5 lots pour un total de 1750 m^3, voir figure 1) puis

les nouveaux II (5 autres lots pour un total de 9000 - 1750 = 7.250 m^3), le respect des contraintes de composition de l'output étant assuré en pratique par ces 10 lots élémentaires, ce qui fait que, le vidage de la cuve de la ST n'est possible qu'une fois la cuve pleine ; pour la seconde commande élémentaire, le vidage et le remplissage peuvent être simultanés, les contraintes de composition étant respectée au mélange effectué à l'entrée de la cuve; *vi*) les disponibilités et caractéristiques chimiques des IP varient au cours du temps en fonction des prélèvements et de l'extraction minière (à flux poussés).

Les inputs qui ne sont pas exportés sont directement utilisés pour produire de l'acide phosphorique dans des usines chimiques de l'OCP. Les contraintes de composition sont respectées par tous les outputs et, à la demande du client industriel, on a introduit une contrainte technique additionnelle. En cohérence avec le processus industriel, le critère d'optimisation retenu est celui de la stabilisation de la composition de deux commandes successives, pour limiter l'incidence de la variation de composition de deux commandes successives.

Ce problème original de blending est formulé par un programme mathématique quadratique en nombres entiers, visant à déterminer simultanément les quantités d'IP à prélever et leurs gammes de traitement en laverie, en tenant compte de l'ensemble des caractéristiques citées précédemment (§2). Une application numérique est fournie en §3, avant une brève conclusion.

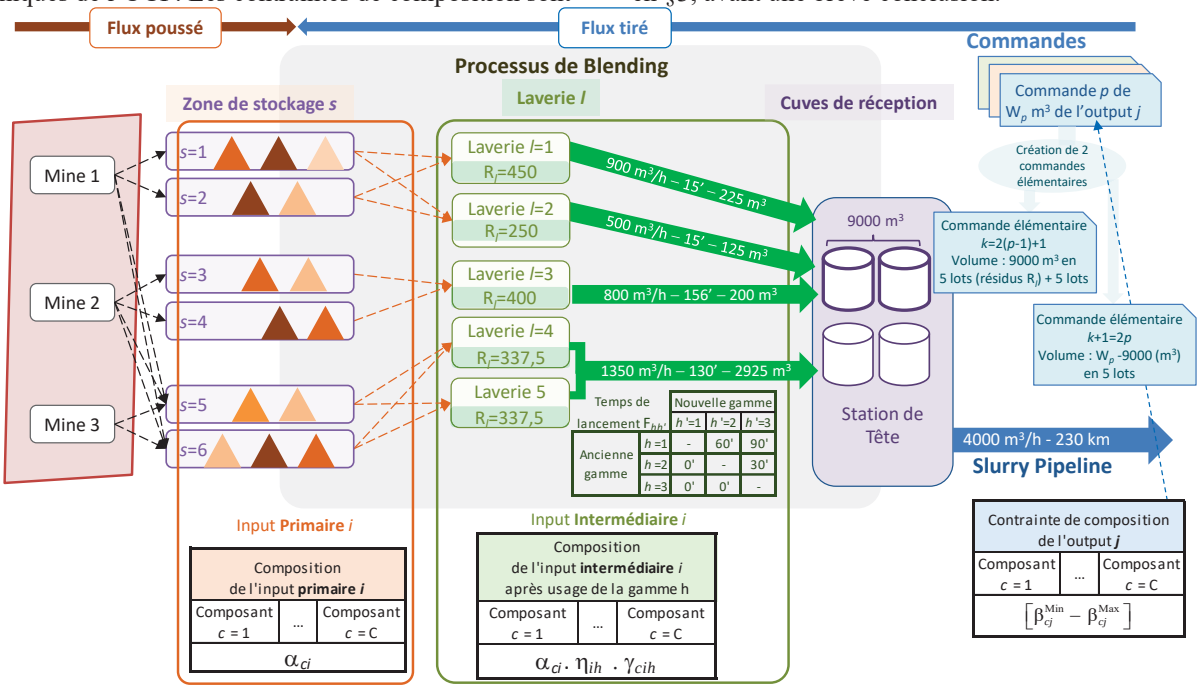


Figure 1 : Schéma de flux de la chaîne logistique étudiée

2 DESCRIPTION DU PROBLEME ET FORMULATION MATHEMARIQUE

Le problème considéré consiste à satisfaire un ensemble séquencé de P commandes, chacune étant caractérisée par un output à fabriquer parmi J outputs et un volume W_p (exprimé en m^3). Pour chaque output, il faut respecter des contraintes de composition définies par des bornes inférieures et supérieures pour quatre composants chimiques. Pour les raisons expliquées dans l'introduction, la commande p est décomposée en deux commandes élémentaires, la première indexée par $k = 2 \cdot p - 1$ et la seconde par $k+1 = 2 \cdot p$. Le volume de la première commande élémentaire est équivalent au remplissage d'une cuve de la ST (9000 m^3) par des II provenant simultanément de L=5 laveries, sans vidage préalable de la cuve ; la seconde commande élémentaire, d'un volume $W_p - 9000$ est constituée dès le début du vidage du lot précédent dans le slurry pipeline, le vidage et le remplissage pouvant donc s'effectuer simultanément pour ce second lot élémentaire.

En amont de chaque ligne de laverie se trouve un sous-ensemble de I IP, répartis dans l'une des S=6 zones de stockage selon le gisement d'où il a été extrait. Pour la constitution d'une commande élémentaire, chaque laverie est alimentée par un seul IP, donnant lieu à un II à l'aide d'une seule gamme h, parmi $H = 3$ gammes possibles. Chaque gamme engendre 1) des pertes de matières suivant un coefficient de réduction propre à cette gamme, 2) une augmentation ou diminution de la concentration des composants chimiques de l'IP traité, suivant des coefficients de distorsion relatifs à cette gamme. Le traitement d'un IP dans une laverie prend environ 30', quelle que soit la laverie. En conséquence, lors du changement d'IP alimentant la laverie l, sa cuve contient un lot de l'IP précédent, de volume R_l, équivalent à un résidu d'une demi-heure de production de la laverie en question (donc dépendant du débit de cette laverie). Ce changement d'IP engendre des coûts supplémentaires liés au déplacement de machines de déstockage en amont des laveries que l'on cherche à limiter.

Le changement de gamme sur une laverie peut donner lieu à un temps de lancement pendant lequel l'IP précédent

séjourne dans les installations avant reprise de l'alimentation (voir figure 1). Ces temps de lancement sont pris en compte dans la distribution des volumes à produire sur chaque laverie, afin de maintenir une synchronisation de production de la commande élémentaire en question (si une laverie est momentanément neutralisée en raison d'un temps de lancement, la production équivalente à ce temps est répartie sur les autres laveries).

Par ailleurs, le critère d'optimisation retenu dans le modèle vise à minimiser les coûts de production des outputs (extraction et traitements en laverie) tout en cherchant à stabiliser la composition des outputs commandés par le client interne. Pour ce dernier, la composition d'une commande interne doit être la plus proche d'une structure cible pour éviter des coûts de réglages élevés (difficilement quantifiables actuellement), ce qui conduit à introduire dans le critère d'optimisation la valorisation de la déviance par un coût de pénalité arbitraire qui permet d'orienter la solution retenue dans l'ensemble des solutions respectant les contraintes du problème ; nous discuterons au §3.2 l'impact du choix de cette pénalité.

Le modèle détermine pour chaque laverie la quantité d'IP à traiter pour obtenir le lot de l'II utilisé pour fabriquer une commande élémentaire, en tenant compte des impératifs de synchronisation et d'éventuels temps de lancements ainsi que la gamme à utiliser.

2.1 Indices

-*i* : indice de l'input $(i = 1...\mathrm{I})$.

-*c* : indice du composant chimique $(c = 1...\mathrm{C})$.

-s : indice de la zone de stockage des inputs $(s = 1...\mathrm{S})$.

-*h* : indice de la gamme $(h = 1...\mathrm{H})$.

-*l* : indice de la laverie $(l = 1...\mathrm{L})$.

-*p* : indice de la commande à fabriquer $(p = 1...\mathrm{P})$.

-*k* : indice du commande élémentaire à fabriquer $(k = 1...\mathrm{K})$.

-*j* : indice de l'output $(j = 1...\mathrm{J})$.

2.2 Paramètres

Les poids sont exprimés en tonne, les volumes en m^3 et les coûts en euro, à partir de coûts conventionnels pour des raisons évidentes de confidentialité. La conversion de la tonne en m^3 est assurée par un coefficient noté θ, qui exprime le produit de la densité (en tonne/m^3) par un indicateur nommé taux de solide (en %), exprimant la concentration du produit dans l'eau.

- τ_l : numéro de l'IP présent dans la laverie *l* au début de la fabrication de la première commande élémentaire.
- R_l : volume résiduel dans la laverie *l* au début de la fabrication d'une commande élémentaire.
- α_{ci} : proportion du composant *c* dans le poids de l'IP *i*.
- $\alpha_{c\tau_l}$: proportion du composant *c* dans le poids du volume résiduel R_l de l'IP τ_l à la laverie *l* au début de la fabrication de la première commande élémentaire.
- ψ_i : numéro de la zone de stockage de l'IP *i*.
- S_{i0} : quantité de l'IP *i* disponible au stock amont au début de l'horizon considéré (tonne).
- μ_k : numéro d'output de la commande élémentaire *k*.
- ρ_l : minimum entre le débit de production et de transfert pour une laverie *l*
- G_l : nombre maximal de changement autorisé d'IP sur la ligne *l*.
- E_k : booléenne valant 1 si la commande élémentaire *k* concerne un client interne, 0 sinon.
- η_{ih} : coefficient de réduction de l'IP *i* par la gamme *h*. Si la gamme *h* n'est pas utilisable pour traiter l'IP *i*, alors $\eta_{ih} = 0$.
- γ_{cih} : coefficient de distorsion du composant *c* de l'IP *i* par la gamme *h*.
- $\mathrm{F}_{hh'}$: temps de lancement lors du passage d'une gamme *h* à une gamme *h*'.
- $\beta_{cj}^{\mathrm{Min}}$: borne inférieure de la proportion (%) du composant *c* dans le poids de l'output *j* ; l'output de la commande élémentaire *k* étant noté μ_k, cette borne devient $\beta_{c\mu_k}^{\mathrm{Min}}$.
- $\beta_{cj}^{\mathrm{Max}}$: borne supérieure de la proportion (%) du composant *c* dans le poids de l'output *j* ; l'output du lot élémentaire *k* étant notée μ_k, cette borne devient $\beta_{c\mu_k}^{\mathrm{Max}}$.
- δ_{cj} : valeur cible de la proportion (%) du composant *c* dans le poids de l'output *j* ; l'output du lot élémentaire *k* étant notée μ_k, cette valeur devient $\delta_{c\mu_k}$. Cette valeur cible n'est utilisée que si l'output *j* est commandé par un client interne $(\mathrm{E}_k = 1)$.
- W_k : volume de la commande élémentaire *k* à fabriquer.
- Π_{sl} : booléenne valant 1 si la zone de stockage *s* alimente la laverie *l*, et 0 sinon.
- θ : coefficient de convertion du poids (tonne) en volume (m^3).
- σ_c : coût unitaire (par m^3) de la pénalité associée à l'écart absolu Δ_{ck} entre la quantité cible souhaitée δ_{cj} du composant *c* de l'output *j* et celle obtenue par le mélange produisant cet output.
- χ : coût d'extraction d'une tonne d'IP.
- δ_h : coût de traitement d'une tonne d'IP par la gamme *h*.

2.3 Variables

- ω_{ihlk} : *variable de décision* - binaire valant 1 si l'IP *i* est traité par la gamme *h* sur la laverie *l* pour produire la commande élémentaire *k*, 0 sinon.
- y_{ilk} : *variable intermédiaire* – binaire valant 1 s'il y a changement d'IP à traiter sur de la laverie *l* entre les commandes élémentaires $k-1$ et *k*, 0 sinon.
- $z_{hh'lk}$: *variable intermédiaire* – binaire valant 1 s'il y a changement d'une gamme *h* à la gamme $h' \neq h$ sur la

laverie *l* entre les commandes élémentaires $k-1$ et *k*, 0 sinon.

- S_{ik} : *variable intermédiaire* – stock de l'IP *i* (tonne) à la fin de fabrication de la commande élémentaire *k.*
- T_k : *variable intermédiaire* – durée de production du lot élémentaire *k* sur les laveries.
- v_{kl} : *variable intermédiaire* - volume à produire sur la laverie *l* pour la constitution de la commande élémentaire *k.*
- λ_{clk} : *variable intermédiaire* – poids du composant *c* dans le volume v_{kl} produit par la laverie *l* pour la constitution de la commande élémentaire *k.*
- Δ_{ck} : *Variable intermédiaire* – écart absolu du composant *c* de sa valeur cible dans la commande élémentaire *k*, passée par un client interne $(E_k = 1)$.

2.4 Contraintes

La relation 1 impose, pour la fabrication d'une commande élémentaire *k*, de traiter un seul IP *i* sur une laverie *l* avec une seule gamme *h*. La restriction $\Pi_{\psi_i l}\eta_{ih} > 0$ est introduite car la variable ω_{ihlk} n'existe que pour les IPs qui peuvent être traitées sur la laverie *l* ($\Pi_{\psi_i l} > 0$) et utilser la gamme *h* ($\eta_{ih} > 0$). Cette notion de prédicat[1] a l'avantage de limiter drastiquement le nombre de variables dans le modèle d'optimisation.

$$\sum_{h,i} \omega_{ihlk|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} = 1; \forall l,k \qquad (1)$$

Les deux relations 2 permettent de respecter les contraintes de convoyage de telle sorte que chacune des deux laveries $l=1$ et $l=2$ (et donc $l<3$) soient alimentées par une seule zone parmi $s=1$ et $s=2$ (respectivement chacune des laveries $l=4$ et $l=5$ (et donc $l>3$ l>3) soient alimentées par une seul zone parmi $s=5$ et $s=6$).

$$\begin{cases} \sum_{i,h,l|l<3\wedge\psi_i=s\wedge\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} \omega_{ihlk} \le 1, \forall k, s \,|\, s \in \{1,2\} \\ \sum_{i,h,l|l>3\wedge\psi_i=s\wedge\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} \omega_{ihlk} \le 1, \forall k, s \,|\, s \in \{5,6\} \end{cases} \qquad (2)$$

Sur une laverie *l*, on a un passage de la gamme *h* à la gamme *h'* ($h \neq h'$) entre deux commandes consécutives $k-1$ et k ($k>1$), si la somme $\sum_{i|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih'}>0}\omega_{ih'lk} + \sum_{i|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0}\omega_{ihlk-1}$ vaut 2. Si par contre cette somme vaut 1 ou 0, alors la laverie *l* opère les deux commandes successives *k-1* et *k* avec la même gamme. Ainsi, la variable binaire $z_{hh'lk}$ doit vérifier les conditions suivantes : $z_{hh'lk}=1$ si la somme précédente vaut 2 ; $z_{hh'lk}=0$ si la somme précédente est <2 . Les relations 3 permettent de modéliser ces conditions.

$$\begin{cases} z_{hh'lk} \ge \left(\sum_{i|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih'}>0}\omega_{ih'lk} + \sum_{i|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0}\omega_{ihlk-1}\right) - 1 \\ z_{hh'lk} \le \dfrac{\sum_{i|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih'}>0}\omega_{ih'lk} + \sum_{i|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0}\omega_{ihlk-1}}{2} \\ \forall h,h',l,k \,|\, k>1 \wedge F_{hh'}>0 \end{cases} \qquad (3)$$

La relation 4 permet de déterminer la durée de production d'une commande élémentaire *k* en répartissant le volume total W_k de la commande élémentaire *k* sur l'ensemble des laveries, compte tenu des arrêts de production $\sum_{h,h',l|F_{hh'}>0} F_{hh'}.z_{hh'lk}.\rho_l$, suite à un éventuel changement de gamme entre deux commandes consécutives.

$$T_k = (W_k + \sum_{hh'l|F_{hh'}>0} F_{hh'}.z_{hh'lk}.\rho_l) / \sum_l \rho_l, \forall k \qquad (4)$$

La relation 5 exprime le volume à produire sur la laverie *l* pour la fabrication de la commande élémentaire *k* compte tenu d'éventuels changements de gamme entre deux commandes consécutives.

$$v_{kl} = (T_k - \sum_{hh'|F_{hh'}>0} F_{hh'}.z_{hh'lk}).\rho_l, \forall l,k \qquad (5)$$

La relation 6 permet le calcul du stock d'un IP *i* à la fin de la production d'une commande élémentaire *k*, en retranchant du stock initial, le cumul des volumes consommés d'un IP *i*, ramené à la tonne en multipliant par le coefficient θ/η_{ih} . A noter que cette relation est non linéaire à cause du produit de deux variables $v_{kl}.\omega_{ihlk}$ [2].

$$S_{ik} = S_{i0} - \sum_{h,l,k'|k'\le k\wedge\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} v_{k'l}.\omega_{ihlk'}.\theta/\eta_{ih}; \forall i,k \qquad (6)$$

La relation 7 impose de ne pas consommer plus d'IP que les quantités disponibles en stock.

$$S_{ik} \ge 0; \forall i,k \qquad (7)$$

Sur une laverie *l*, on a un passage de l'IP *i'* à l'IP *i* ($i \neq i'$) entre deux commandes élémentaires consécutives *k*-1 et *k* si les différences $\sum_h \omega_{ihlk} - \sum_h \omega_{ihlk-1} = 1$ et $\sum_h \omega_{i'hlk} - \sum_h \omega_{i'hlk-1} = -1$. En effet, l'expression $\sum_h \omega_{ihlk} - \sum_h \omega_{ihlk-1} = 1$ signifie que l'IP *i* n'est pas utilisé sur la laverie *l* pour la fabrication de la commande $k-1$ mais l'est pour la fabrication de la commande *k* (et inversement pour l'expression $\sum_h \omega_{ihlk} - \sum_h \omega_{ihlk-1} = -1$). Si par contre cette différence vaut 0, il n'y a pas de changement d'IP sur la laverie *l* entre deux commandes consécutives. Pour ne pas comptabiliser le changement d'IP deux fois, la variable binaire y_{ilk} doit vérifier les conditions suivantes : si $\sum_h \omega_{ihlk} - \sum_h \omega_{ihlk-1} = 1$ alors

[1] L'opérateur " | " définit une restriction de l'ensemble d'indices utilisés pour définir une variable souscrite, comme dans la somme (Σ) de variables souscrites ou dans une expression de répétition (quantificateur ∀).

[2] Relation (6) est non linéaire mais est linéarisée par la propriété suivante : soient x, w et z trois variables binaires. Alors l'expression $z = x \cdot w$ est équivalentes aux deux inégalités suivantes : $z \ge x + w - 1$ et $z \le \dfrac{x+w}{2}$

$y_{ilk}=1$; si $\sum_h \omega_{ihlk} - \sum_h \omega_{ihlk-1}$ vaut 0 ou -1 alors $y_{ilk}=0$. Ces conditions peuvent être exprimées de façon linéaire par les relations 8.

$$\begin{cases} y_{ilk} \geq \dfrac{\sum_{h|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} \omega_{ihlk} - \sum_{h|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} \omega_{ihlk-1}}{2} - \dfrac{1}{4} \\ y_{ilk} \leq \dfrac{\sum_{h|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} \omega_{ihlk} - \sum_{h|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} \omega_{ihlk-1}}{2} + \dfrac{1}{2} \\ y_{ilk} \geq 0 \\ \forall i,l,k \mid k>1 \end{cases} \quad (8)$$

La relation 9 limite le nombre de changement d'IP entre deux commandes élémentaires consécutives sur une laverie l par un nombre maximal de changements autorisés G_l.

$$\sum_{i,k|k>1\wedge\Pi_{\psi_i l}>0} y_{ilk} \leq G_l ; \forall l \quad (9)$$

Les relations 10 calculent le poids λ_{clk} du composant c dans le volume v_{kl} produit par la laverie l pour la fabrication d'une commande k compte tenu du résidu des laveries. On distingue alors deux cas : 1) pour $k=1$, la proportion $\alpha_{c\tau_l}$ du composant c du résidu sur la laverie l est connue au début de la fabrication de celui-ci ; 2) pour une commande $k>1$, la composition du résidu sur une laverie vaut la composition de l'II traité pour la fabrication du lot $k-1$. À noter que les relations 10 sont également non linéaires mais linéarisées par la méthode présentée en note de la page précédente.

$$\begin{cases} \lambda_{clk} = \begin{pmatrix} R_l.\alpha_{c\tau_l} \\ +\sum_{i,k,h|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} (v_{kl}-R_l).\omega_{ihlk}.\alpha_{ci}.\gamma_{cih} \end{pmatrix} \\ ; \forall c,l,k \,|\, k=1 \\ \lambda_{clk} = \begin{pmatrix} \sum_{i,h|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} R_l.\omega_{ihlk-1}.\alpha_{ci}.\gamma_{cih} \\ +\sum_{i,h|\Pi_{\psi_i l}.\eta_{ih}>0} (v_{kl}-R_l).\omega_{ihlk}.\alpha_{ci}.\gamma_{cih} \end{pmatrix} \\ ; \forall c,l,k \mid k>1 \end{cases} \quad (10)$$

La relation 11 impose le respect des bornes supérieures et inférieures de chaque composant c pour l'ensemble des flux des laveries mobilisées pour la fabrication de la commande élémentaire k (Tableau 2 de §3). Cette relation n'est pas valable pour le composant c=4 de l'output j=1, pour lequel la contrainte de composition est exprimée par la relation 12.

$$\begin{aligned} &\beta^{Min}_{c\mu_k}.\sum_l v_{kl} \leq \sum_l \lambda_{clk} \leq \beta^{Max}_{c\mu_k}.\sum_l v_{kl} \\ &; \forall c,k \mid c<4 \vee (c=4 \wedge \mu_k \neq 1) \end{aligned} \quad (11)$$

La relation 12 traduit la contrainte entre les composants c=1 ($\sum_l \lambda_{c=1,lk}$) et c=4 ($\sum_l \lambda_{c=4,lk}$) pour l'output j=1, exprimée par le client interne, seul à commander cet output.

$$\begin{aligned} &\beta^{Min}_{c\mu_k}.\sum_l \lambda_{c=1,lk} \leq 218{,}5.\sum_l \lambda_{c=4,lk} \leq \beta^{Max}_{c\mu_k}.\sum_l \lambda_{c=1,lk} \\ &; \forall k \mid \mu_k = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

Les relations 13 calculent les écarts absolus entre la composition de la commande élémentaire et la valeur cible des composants demandée par un client interne.

$$\begin{cases} \Delta_{ck} \geq \sum_l \lambda_{clk} - \delta_{c\mu_k}.\sum_l v_{kl} \\ \Delta_{ck} \geq \delta_{c\mu_k}.\sum_l v_{kl} - \sum_l \lambda_{clk} \end{cases} ; \forall c,k \,|\, E_k = 1 \quad (13)$$

La relation 14 impose le respect de conditions d'opérabilité des gammes sur certaines laveries. Dans notre cas, si la laverie l=4 utilise la gamme h=2, alors la laverie l=5 ne peut opérer qu'avec la gamme h=1.

$$\begin{aligned} &\omega_{i,h=2,l=5,k} \leq 1 - \sum_{h>1} \omega_{ih,l=4,k} ; \forall i,k \\ &| (\Pi_{\psi_i l=4}.\eta_{ih=2} > 0 \vee \Pi_{\psi_i l=4}.\eta_{ih=3} > 0) \wedge \Pi_{\psi_i l=5}.\eta_{ih=2} > 0 \end{aligned} \quad (14)$$

La fonction-objectif 15 est une somme 1) du coût de la stabilité de la composition des commandes élémentaires k autour des valeurs cibles fixées pour les composants considérés ; ce coût totalement arbitraire est propre à chaque composant chimique ; 2) du coût de perte de matière lié à l'utilisation des gammes ; ce coût est composé du coût unitaire d'une tonne d'IP extrait, noté χ, et du coût unitaire d'une tonne d'IP traité par la gamme h, noté δ_h.

$$Min\begin{pmatrix} \sum_{ck} \sigma_c.\Delta_{ck} \\ +\sum_{ihlk} (\chi+\delta_h).\omega_{ihlk}.v_{kl}.(1-\eta_{ih}).(\theta/\eta_{ih}) \end{pmatrix} \quad (15)$$

3 ILLUSTRATION

Dans la présente section, nous présentons dans une première partie les données d'entrée pour le test, suivie des résultats fournis par optimisation linéaire du modèle élaboré dans la section §2, avant de finir avec la génération du programme horaire de production des lignes sur un horizon temporel.

3.1 Données du test

Le modèle mathématique linéaire a été testé avec des données proches de celles employées par le Groupe OCP dans la planification de sa production du site minier de Khouribga (les données structurelles sont réelles et les données concernant l'état initial sont proches de la réalité). Dans ce test, 18 IP répartis sur les 6 zones de stockage ont été retenus. Pour chaque IP sont connus les caractéristiques chimiques, les coefficients de réduction (Tableau 1) et les coefficients de distorsion des composants selon les trois modes de traitement possibles.

L'étude a été réalisée sur deux outputs qui sont actuellement expédiés par pipeline ; l'output j=1 est commandé par un client interne. Les contraintes de composition de ces outputs pour les quatre composants chimiques retenus sont fournies dans le Tableau 2.

Dans l'exemple retenu, quatre commandes sont programmées sur un horizon d'un jour. Chaque commande est donc décomposée en deux commandes élémentaires, soit huit commandes élémentaires à fabriquer au total (Tableau 3).

Sur l'horizon considéré, seul un changement d'IP est autorisé par laverie pour la fabrication de l'ensemble des huit commandes élémentaires. En outre, l'état initial des productions en cours sur les laveries au début de l'horizon considéré est fourni sur le Tableau 4.

Par ailleurs, les coûts de la fonction-objectif sont définis comme suit : le coût unitaire pour chaque m^3 d'écart aux valeurs cibles est identique pour tous les composants, fixé à $\sigma_c = \sigma = 100$; les coûts unitaires d'extraction ($\chi = 3$) et de traitement ($\varphi_{h=1} = 2$; $\varphi_{h=2} = 4$; $\varphi_{h=3} = 5$) sont factices pour des raisons de confidentialité.

3.2 Solution obtenue

Dans la partie présente, nous présentons les résultats d'optimisation obtenus avec le modeleur Xpress. Le temps de résolution est d'une demi-heure environ sur un serveur d'une vitesse d'exécution de 3.5 GHz et d'une mémoire installée de 64 Go.

Le Tableau 5 présente, pour chaque laverie *l*, les IP à prélever et leur zone de stockage *s*, la quantité de prélèvement (en tonne) et la gamme *h* à appliquer pour la fabrication de chacun des huit commandes élémentaires.

Zone de stockage *s*		*s*=1			*s*=2			*s*=3			*s*=4			*s*=5			*s*=6		
IP *i*		*i*=1	*i*=2	*i*=3	*i*=4	*i*=5	*i*=6	*i*=7	*i*=8	*i*=9	*i*=10	*i*=11	*i*=12	*i*=13	*i*=14	*i*=15	*i*=16	*i*=17	*i*=18
Quantité initiale (10^3 tonne)		12	15	15	15	12	15	12	15	12	12	15	15	15	15	12	15	12	15
Composition chimique	*c*=1	56,0%	60,0%	55,0%	54,0%	61,0%	62,0%	61,4%	58,6%	57,0%	59,0%	54,4%	61,0%	64,5%	61,5%	60,3%	55,5%	60,5%	61,0%
	c=2	1,5%	1,0%	1,7%	1,3%	1,3%	1,6%	1,0%	1,1%	1,3%	1,2%	1,2%	1,4%	0,7%	0,9%	1,1%	0,9%	0,7%	1,1%
	c=3	3,3%	3,1%	3,5%	3,4%	2,9%	3,2%	4,7%	5,6%	3,9%	5,0%	5,6%	4,1%	4,6%	5,1%	4,4%	7,0%	5,7%	4,8%
	c=4	0,0020%	0,0019%	0,0022%	0,0018%	0,0017%	0,0019%	0,0021%	0,0022%	0,0023%	0,0022%	0,0025%	0,0021%	0,0022%	0,0020%	0,0020%	0,0021%	0,0018%	0,0020%
Coefficient de réduction	*h*=1	0,64	0,69	0,64	0,64	0,69	0,69	0,72	0,67	0,66	0,67	0,66	0,67	0,78	0,71	0,71	0,69	0,71	0,71
	h=2	0,58	0,63	0,58	0,58	0,63	0,63	0,71	0,66	0,65	0,66	0,65	0,66	0,75	0,63	0,63	0,6	0,63	0,63
	h=3	0,55	0,58	0,55	0,55	0,58	0,58	-	-	0,51	-	0,51	-	-	-	-	0,52	-	-

Tableau 1 : Quantité des IP disponibles, leur composition chimique α_{ci} et leur coefficient de réduction η_{ih}

		Caractéristiques de l'output *j*=1			Caractéristiques de l'output *j*=2		
		Valeur minimale β_{c1}^{Min}	Valeur maximale β_{c1}^{Max}	Valeur cible δ_{c1}	Valeur minimale β_{c2}^{Min}	Valeur maximale β_{c2}^{Max}	Valeur cible δ_{c2}
Composant *c*	*c*=1 (P_2O_5)	65,0%	100%	66,6%	65,0%	66,0%	65,0%
	c=2	0%	0,85%	0,85%	-	-	-
	c=3	-	-	-	2,2%	3,9%	3,2%
	c=4	0 mg/P_2O_5	70 mg/P_2O_5	65 mg/P_2O_5	0,0018%	0,0025%	0,0025%

Tableau 2 : Caractéristiques chimiques des outputs étudiés

	Volume total des commandes d'output (m^3)			
	Output *j*=1	Output *j*=2	Output *j*=1	Output *j*=1
	22 000	18 000	23 000	22 000

	Commande élémentaire *k*							
	k=1	*k*=2	*k*=3	*k*=4	*k*=5	*k*=6	*k*=7	*k*=8
W_k (m^3)	9 000	13 000	9 000	9 000	9 000	14 000	9 000	13 000
$W_k \cdot \theta$ (tonne)	8 064	11 648	8 064	8 064	8 064	12 544	8 064	11 648

Tableau 3 : Commandes d'output à fabriquer et leur répartition en commandes élémentaires

		Quantité résidu (m^3)	**Composant chimique du premier résidu**			
			***c*=1**	***c*=2**	***c*=3**	***c*=4**
Laverie *l*	***l*=1**	450	67,40%	0,54%	1,65%	0,0018%
	***l*=2**	250	68,52%	0,72%	1,55%	0,0017%
	***l*=3**	400	68,03%	0,56%	2,21%	0,0016%
	***l*=4**	337,5	66,35%	0,48%	2,56%	0,0025%
	***l*=5**	337,5	60,73%	0,31%	3,85%	0,0024%

Tableau 4 : Quantité du résidu par laverie et les caractéristiques chimiques du premier résidu

			Commande élémentaire *k*							
			Output *j* =1		Output *j* =2		Output *j* =1		Output *j* =1	
			***k*=1**	***k*=2**	***k*=3**	***k*=4**	***k*=5**	***k*=6**	***k*=7**	***k*=8**
Laverie *l*	*l* =1	Input primaire *i*	s=2 / i=6	s=2 / i=6	s=2 / i=6	s=2 / i=6	s=1 / i=2	s=1 / i=2	s=1 / i=2	s=1 / i=2
		Quantité prélevée (tonne)	**3525**	**5091**	**2963**	**2963**	**2963**	**4609**	**2963**	**4280**
		Total par IP (tonne)	**14542**				**14814**			
		Gamme *h* utilisée	*h* =3	*h* =3	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1
	l =2	Input primaire *i*	s=1 / i=1	s=1 / i=1	s=1 / i=1	s=1 / i=1	s=2 / i=5	s=2 / i=5	s=2 / i=5	s=2 / i=5
		Quantité prélevée (tonne)	**1958**	**2829**	**1958**	**1958**	**1803**	**2804**	**1803**	**2604**
		Total par IP (tonne)	**8703**				**9014**			
		Gamme *h* utilisée	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2
	l =3	Input primaire *i*	s=3 / i=8	s=3 / i=8	s=3 / i=8	s=3 / i=8	s=4 / i=12	s=4 / i=12	s=4 / i=12	s=4 / i=12
		Quantité prélevée (tonne)	**2753**	**3977**	**2753**	**2753**	**2753**	**4283**	**2753**	**3977**
		Total par IP (tonne)	**12237**				**13767**			
		Gamme *h* utilisée	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2	*h* =2
	l =4	Input primaire *i*	s=6 / i=18	s=6 / i=18	s=6 / i=18	s=6 / i=18	s=6 / i=17	s=6 / i=17	s=6 / i=17	s=6 / i=17
		Quantité prélevée (tonne)	**2160**	**3119**	**2160**	**2160**	**2160**	**3359**	**2160**	**3119**
		Total par IP (tonne)	**9598**				**10798**			
		Gamme *h* utilisée	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1
	l =5	Input primaire *i*	s=5 / i=14	s=5 / i=14	s=5 / i=14	s=5 / i=13	s=5 / i=13	s=5 / i=13	s=5 / i=13	s=5 / i=13
		Quantité prélevée (tonne)	**2160**	**3119**	**2160**	**1966**	**1966**	**3058**	**1966**	**2839**
		Total par IP (tonne)	**7439**		**11795**					
		Gamme *h* utilisée	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1	*h* =1
Total des prélèvements pour la commande élémentaire *k* (tonnes)			**12556**	**18136**	**11994**	**11800**	**11644**	**18114**	**11644**	**16820**

Tableau 5 : Quantités à prélever des IP et à traiter sur les laveries avec la gamme à opérer

Pour les trois commandes liées à l'output *j*=1, les mélanges ne sont pas identiques. En effet, pour les commandes élémentaires *k*=1 et *k*=2, la combinaison proposée par le modèle fait intervenir les IP *i*={1, 6, 8, 14 et 18} traitées respectivement par les modes *h*={1, 3, 2, 1, 1} ; alors que pour les commandes élémentaires *k*=4 à *k*=8, le mélange proposé implique un prélèvement des IP *i*={2, 5, 12, 13, 17} traités respectivement par les gammes *h*={1, 2, 2, 1, 1}. Cette différence s'explique par l'insuffisance des stocks des IP *i* = {2, 6}. Par ailleurs, on constate que le nombre maximal de changement d'IP par laverie est bien respecté (un seul changement permis pour la fabrication de l'ensemble des commandes programmées). De plus, un seul changement de gamme a été proposé, qui est le passage du mode *h*=3 à *h*=1 sur la laverie *l*=1 entre les commandes élémentaires *k*=2 et *k*=3. Ce changement n'engendre pas de temps de lancement d'après la Figure 1.

Le modèle permet aussi de déterminer, pour chaque commande élémentaire, le volume à produire sur chaque laverie (en colonnes du Tableau 6) compte tenu des temps de changement s'ils ont lieu (variable intermédiaire), ainsi que la composition chimique en sortie de chaque laverie.

			Laverie					
			l=1	*l*=2	*l*=3	*l*=4	*l*=5	TOTAL
Commande élémentaire *k*=1	Volume total (m^3)		**2282**	**1268**	**2028**	**1711**	**1711**	**9000**
	Volume résiduel du lot *k*-1 (m^3)		450	250	400	337,5	337,5	1775
	Composant	*c*=1 (%)	70,43%	68,54%	64,79%	64,60%	63,92%	66,55%
		c=2 (%)	0,88%	0,81%	0,79%	0,66%	0,52%	0,74%
		c=3 (%)	1,32%	1,68%	2,50%	2,43%	2,81%	2,13%
		c=4 (mg/P_2O_5)	55,73	73,98	57,88	82,14	82,47	68,59
	Gamme		*h*=3	*h*=2	*h*=2	*h*=1	*h*=1	
Commande élémentaire *k*=2	Volume total (m^3)		**3296**	**1831**	**2930**	**2472**	**2472**	**13000**
	Volume résiduel du lot *k*-1 (m^3)		450	250	400	337,5	337,5	1775
	Composant	*c*=1 (%)	71,18%	68,54%	63,99%	64,17%	64,70%	66,62%
		c=2 (%)	0,96%	0,84%	0,84%	0,70%	0,57%	0,79%
		c=3 (%)	1,24%	1,71%	2,57%	2,40%	2,55%	2,08%
		c=4 (mg/P_2O_5)	55,41	79,12	59,57	82,40	81,73	69,56
	Gamme		*h*=3	*h*=2	*h*=2	*h*=1	*h*=1	
Commande élémentaire *k*=3	Volume total (m^3)		**2282**	**1268**	**2028**	**1711**	**1711**	**9000**
	Volume résiduel du lot *k*-1 (m^3)		450	250	400	337,5	337,5	1775
	Composant	*c*=1 (%)	67,04%	68,54%	63,99%	64,17%	64,70%	65,58%
		c=2 (%)	1,09%	0,84%	0,84%	0,70%	0,57%	0,83%
		c=3 (%)	1,91%	1,71%	2,57%	2,40%	2,55%	2,24%
		c=4 (%)	0,0020%	0,0025%	0,0017%	0,0024%	0,0024%	0,0022%
	Gamme		*h*=1	*h*=2	*h*=1	*h*=1	*h*=1	
Commande élémentaire *k*=4	Volume total (m^3)		**2282**	**1268**	**2028**	**1711**	**1711**	**9000**
	Volume résiduel du lot *k*-1 (m^3)		450	250	400	337,5	337,5	1775
	Composant	*c*=1 (%)	66,03%	68,54%	63,99%	64,17%	65,78%	65,52%
		c=2 (%)	1,12%	0,84%	0,84%	0,70%	0,81%	0,88%
		c=3 (%)	2,07%	1,71%	2,57%	2,40%	2,72%	2,32%
		c=4 (%)	0,0021%	0,0025%	0,0017%	0,0024%	0,0024%	0,0022%
	Gamme		*h*=1	*h*=2	*h*=1	*h*=1	*h*=1	
Commande élémentaire *k*=5	Volume total (m^3)		**2282**	**1268**	**2028**	**1711**	**1711**	**9000**
	Volume résiduel du lot *k*-1 (m^3)		450	250	400	337,5	337,5	1775
	Composant	*c*=1 (%)	64,32%	68,51%	66,10%	63,75%	66,05%	65,53%
		c=2 (%)	0,78%	0,86%	1,03%	0,50%	0,87%	0,81%
		c=3 (%)	2,02%	1,50%	2,02%	2,76%	2,76%	2,23%
		c=4 (mg/P_2O_5)	71,00	59,70	55,57	76,29	80,64	68,65
	Gamme		*h*=1	*h*=2	*h*=1	*h*=1	*h*=1	
Commande élémentaire *k*=6	Volume total (m^3)		**3549**	**1972**	**3155**	**2662**	**2662**	**14000**
	Volume résiduel du lot *k*-1 (m^3)		450	250	400	337,5	337,5	1775
	Composant	*c*=1 (%)	63,90%	68,50%	66,61%	63,65%	66,05%	65,52%
		c=2 (%)	0,70%	0,87%	1,07%	0,45%	0,87%	0,79%
		c=3 (%)	2,01%	1,45%	1,88%	2,85%	2,76%	2,20%
		c=4 (mg/P_2O_5)	71,47	54,93	54,63	74,77	80,64	67,53
	Gamme		*h*=1	*h*=2	*h*=1	*h*=1	*h*=1	
Commande élémentaire *k*=7	Volume total (m^3)		**2282**	**1268**	**2028**	**1711**	**1711**	**9000**
	Volume résiduel du lot *k*-1 (m^3)		450	250	400	337,5	337,5	1775
	Composant	*c*=1 (%)	63,90%	68,50%	66,61%	63,65%	66,05%	65,52%
		c=2 (%)	0,70%	0,87%	1,07%	0,45%	0,87%	0,79%
		c=3 (%)	2,01%	1,45%	1,88%	2,85%	2,76%	2,20%
		c=4 (mg/P_2O_5)	71,47	54,93	54,63	74,77	80,64	67,53
	Gamme		*h*=1	*h*=2	*h*=1	*h*=1	*h*=1	
Commande élémentaire *k*=8	Volume total (m^3)		**3296**	**1831**	**2930**	**2472**	**2472**	**13000**
	Volume résiduel du lot *k*-1 (m^3)		450	250	400	337,5	337,5	1775
	Composant	*c*=1 (%)	63,90%	68,50%	66,61%	63,65%	66,05%	65,52%
		c=2 (%)	0,70%	0,87%	1,07%	0,45%	0,87%	0,79%
		c=3 (%)	2,01%	1,45%	1,88%	2,85%	2,76%	2,20%
		c=4 (mg/P_2O_5)	71,47	54,93	54,63	74,77	80,64	67,53
	Gamme		*h*=1	*h*=2	*h*=1	*h*=1	*h*=1	

Tableau 6 : Composition chimique en sortie des laveries pour chaque commande élémentaire *k*

Les cellules en rouges indiquent un non-respect de la borne supérieure ou inférieure pour le composant du lot de l'II produit par la laverie en colonne. Sur les quarante lots d'II produits pour la fabrication des huit commandes élémentaires, seul un lot d'II respecte totalement les spécificités de tous les composants en sortie de la laverie *l*=5 pour la fabrication de la commande élémentaire *k*=4. Cela étant, par le mélange des flux provenant des cinq laveries, toutes les commandes élémentaires respectent bien les caractéristiques des outputs demandés (Tableau 3). Cette approche fournit alors une meilleure flexibilité au niveau des laveries tout en opérant au niveau de performance souhaité.

La fonction-objectif proposée agrège un coût lié à la composition du produit et un coût lié à la production. Ainsi, le modèle permet également de fournir des éléments de négociation aux deux maillons de la chaîne étudiée (le client qui est le complexe chimique et le fournisseur qui est le site minier). En modifiant le coût de la stabilité (fixé dans l'exemple numérique à $\sigma = 100$ pour tous les composants chimiques c, i.e. $\sigma_c = 100, \forall c \in C$) pour prendre successivement les valeurs {0, 10, 20, 50, 100, 500, 1000 et 10000}, nous obtenons les différents coûts optimaux dans le Tableau 7.

Pénalité σ	**0**	**10**	**20**	**50**	**100**	**500**	**1000**	**10000**
Fonction-objectif (10^3)	**207**	**233**	**258**	**326**	**427**	**1151**	**2043**	**18090**
Ecart (m^3)	2651	2536	2292	2031	2015	1783	1783	1783
Ecart %	**3,12%**	**2,98%**	**2,70%**	**2,39%**	**2,37%**	**2,10%**	**2,10%**	**2,10%**
Coût stabilité (10^3)	0	25	46	102	201	892	1783	17830
Quantité IP utilisée (10^3 t)	111	111	111	113	113	116	116	116
Coût production total (10^3)	**207**	**207**	**212**	**224**	**225**	**260**	**260**	**260**

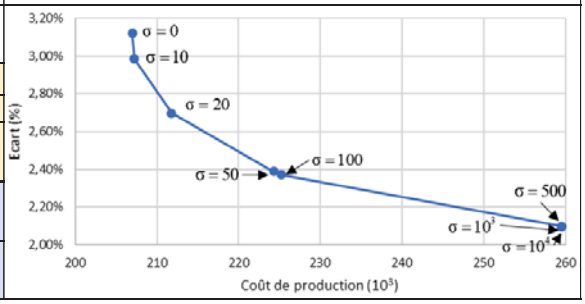


Tableau 7 : Coûts de la fonction-objectif en fonction du coût unitaire de stabilité de la composition

L'introduction d'une pénalité génère une baisse allant jusqu'à 33% de l'écart en m^3 aux valeurs cibles par rapport à coût nul de stabilité pour $\sigma \geq 500$ (cette baisse étant de 24% pour $\sigma = 100$). Néanmoins, cette réduction de l'écart n'est possible que grace à une augmentation de la quantité prélevée des IPs allant jusqu'à 4% (resp. 2%) par rapport à $\sigma = 0$ pour $\sigma \geq 500$ (resp. σ=100), équivalent à une augmentation du coût réel de production allant jusqu'à 25% (resp. 9%) par rapport à $\sigma = 0$ pour $\sigma \geq 500$ (resp. σ=100). Cette illustration fournit ainsi les bases d'une négociation entre deux maillons d'une CL. En effet, la perte d'efficience (augmentation du coût réel) en amont n'est acceptable à un niveau supérieur de supervision de la CL, qu'à condition que l'amélioration de l'efficacité

(ici amélioration de la qualité) en aval se traduise par des économies au moins égales.

3.3 Programme horaire de production

En plus des données de sortie présentées plus haut, le modèle permet de calculer la durée de production de chaque commande élémentaire, qui est identique pour toutes les laveries. Cette durée est calculée comme le quotient du volume de la commande élémentaire considérée par rapport à la somme des débits de production des laveries (voir première ligne du Tableau 8). Pour le lot k=1 par exemple, cette durée est de $9000 / 3550 = 2,54$ h. La première étape pour établir le programme horaire de production des laveries consiste à déterminer la date d'arrivée des commandes programmées à la ST. Pour ce faire, la date d'expédition de chaque commande d'output est retranchée de la durée de production de sa première commande élémentaire. Ainsi, connaissant la date d'expédition de chaque commande d'output (3ième ligne du Tableau 8), on obtient leur date d'arrivée à la ST (dernière ligne du Tableau 8).

	Commande élémentaire k							
	Output j=1		Output j=2		Output j=1		Output j=1	
	k=1	k=2	k=3	k=4	k=1	k=2	k=3	k=4
Durée de production (heure)	2,54	3,66	2,54	2,54	2,54	3,94	2,54	3,66
TOTAL (heure)	6,20		5,07		6,48		6,20	
Date d'expédition de la commande d'output	6h00		12h15		17h15		23h45	
Date d'arrivée de la commande d'output à la ST	3h30		9h45		14h45		21h15	

Tableau 8 : Durée de production et date d'arrivée des commandes d'output à la ST

Pour établir le programme horaire de production des laveries, il faut déterminer les dates de lancement d'OF pour la fabrication des commandes d'output programmées. Pour que les flux des lignes arrivent tous à la ST à la même date, on retranche des dates d'arrivée à la ST, les durées de transport nécessaires pour acheminer les II produits par laveries à la ST (Tableau 9).

		Laverie l				
		l=1	l=2	l=3	l=4	l=5
Date de lancement d'OF pour les commandes d'output	k=1	3h15	3h15	0H55	1h20	
	k=3	9h30	9h30	7h10	7h35	
	k=5	14h30	14h30	12h10	12h35	
	k=7	21h00	21h00	18h40	19h05	

Tableau 9 : Date de lancement d'OF sur les laveries pour chaque commande d'output

Ainsi, connaissant les dates d'arrivée des lots élémentaires à la ST et les dates de lancement des OF d'IP sur les laveries, on peut schématiser les arrivées des lots à la ST (Gantt supérieur de la Figure 2) et les lancements d'ordres de fabrication sur les laveries (Gantt inférieure de la Figure 2). Comme expliqué précédemment, l'instauration d'un régime permanent nécessite une demi-heure environ lors de l'introduction d'un nouvel IP, c'est bien ce résidu qui arrive en premier à 3h30 pour k=1, suivi une demi-heure après de l'II choisi par le modèle. Les dates de lancements d'OF sur le Gantt inférieure sont décalées d'après le Tableau 9, pour tenir compte des durées de transport par pipelines secondaires à la ST.

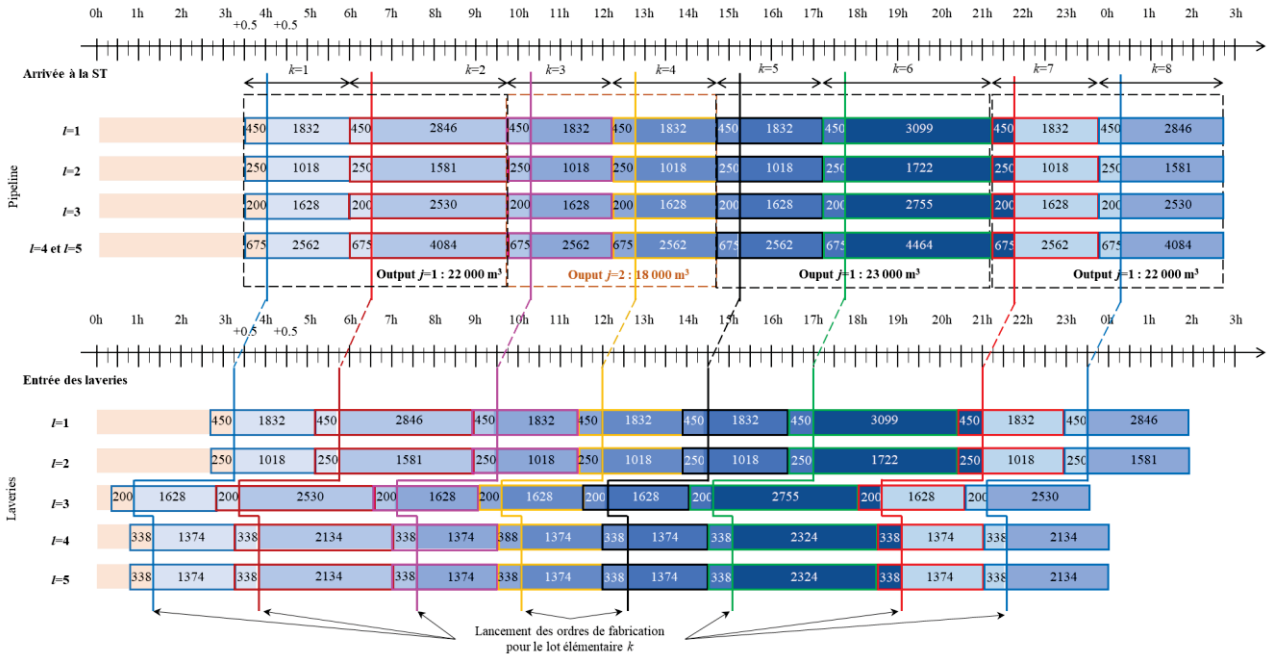


Figure 2 : Programme d'arrivée aux bacs de stockage et programme de production d'OF sur les laveries

4 CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons étudié un cas original du problème de blending appliqué à une Chaîne Logistique minière, dont la mission est de satisfaire un carnet de commandes de produits finis (Output) sur un horizon glissant sur une à deux journées. Une commande d'output est constituée dans des bacs de réception en mélangeant 5 lots de produits intermédiaires (Input Intermédiaire (II)) provenant de manière synchronisée de 5 laveries opérant suivant un flux continu. Ces laveries ne pouvant être alimentée que par un seul minerai (Input primaire (IP)) parmi un ensemble disponible en amont. Le passage en laverie d'un IP implique une modification de sa quantité et qualité pour obtenir un II suivant trois gammes possibles, mutuellement exclusives. L'état initial des laveries est pris en compte dans la modélisation, aboutissant à un modèle mathématique quadratique en nombre entier. Cette formulation permet d'obtenir un programme de production des laveries déterminant les quantités d'II à mélanger pour chaque commande d'output. De plus, le modèle fournit des bases de négociation entre deux maillons de la CL (fournisseur/client) en s'appuyant sur des coûts fictifs (pour des raisons de confidentialité).

REFERENCES

Azzamouri, A., M. Bamoumen, H. Hilali, V. Hovelaque, V. Giard. 2020. "Flexibility of dynamic blending with alternative routings combined with security stocks: a new approach in a mining supply chain", *International Journal of operation research*, DOI: 10.1080/00207543.2020.1814443

L'étude de l'impact des innovations technologiques digitales sur la performance durable d'une chaîne logistique: cas du secteur halio-industriel

BENNOURI Jalila
Equipe de recherche ERETTLOG
ENCG – IBN ZOHR ,
AGADIR MAROC
jalila.ben013@gmail.com

PES ZEROUALI OUARITI Ouafae
Equipe de recherche ERETTLOG
ENCG – IBN ZOHR
AGADIR MAROC
zerouali.ouafae@gmail.com

RESUME *: L'objet de ce travail est de mettre en évidence les répercussions de l'intégration des technologies digitales sur le respect des exigences du développement durable dans une chaine logistique. Il vise à identifier la contribution de la digitalisation dans la performance de la chaine logistique en se basant sur les facteurs socio-économiques et environnementales, afin de mettre à la disposition des acteurs de la chaine logistique de la filière halio-industrielle un outil d'aide à la décision pour s'engager dans une démarche de digitalisation durable.*

MOTS CLES : *Digitalisation- développement durable- chaine logistique – filière halio-industrielle*

ABSTRACT: *The aim of this work is to higlight the repercussion the integration of digital technologies of sustainable development in a supply chain. It aims to identify the contribution of digitalization in the performance of the supply chain based on socio-economic and environmental factors, in order to make available to the actors of the logistics chain of the industrial fishing sector a tool for decision support to engage in a sustainable digitization process.*

KEYWORDS: *Digitalization - sustainable development - logistics chain – industrial fishing sector*

1 INTRODUCTION

Aujourd'hui une nouvelle tendance mondiale en matière des innovations technologiques et de digitalisation a affecté tous les secteurs y compris la logistique. L'émergence de la digitalisation a transformé la chaine logistique classique en digital supply chain (Büyüközkan et Göçer, 2018).

Ce nouveau concept qui est devenu de plus en plus à la mode dans la communauté scientifique, nécessite d'être clarifié afin de décortiquer ses répercussions sur les acteurs de supply chain management et d'en tirer avantage pour inciter les entreprises de s'aventurer dans l'implémentation de digital supply chain(DSC).

En effet, la digitalisation peut constituer un vrai avantage compétitif pour les supply chains et peut contribuer à améliorer leurs performances. Toutefois les supply chains doivent mettre en place des solutions technologiques innovantes afin d'accéder à des nouvelles opportunités sur le marché qui devient lui aussi de plus en plus axés sur les outils technologiques.

Il s'agit d'un processus continue qui vise à maintenir les supply chains à jour et ceci ne peut se réaliser qu'à travers l'implémentation des innovations technologiques dans tous les processus de la supply chain management (Büyüközkan et Göçer, 2018). Suite à cette révolution technologique, les supply chains doivent adapter les nouvelles technologies d'information et de communication mais aussi l'automatisation des opérations afin de rester compétitives et suivre le contexte économique actuel qui complexifie la gestion de la chaine logistique en terme de croissance des exigences des clients, l'augmentation des références des produits et la personnalisation de l'offre produit. Toutefois, un nouveau défi s'ajoute au supply chain digitale, c'est de respecter les exigences du développement durable (Rogetzer et al,2019)

A travers l'analyse de la revue de littérature, on constate que la digitalisation a plusieurs impacts positifs sur la durabilité d'une supply chain ainsi que sur sa performance.

Pour le cas de la filière halio-industrielle, on constate que les innovations technologiques a influencé positivement sur la performance de la supply chain. Cependant, il s'avère difficile

d'évaluer l'impact de la digitalisation sur la performance durable de la supply chain.

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre problématique : Comment intégrer la digitalisation dans une chaine logistique et dans quel mesure les innovations technologiques digitales contribuent à améliorer la performance durable de la supply chain ?

L'intention essentielle de ce travail est de mettre à la disposition des acteurs de la chaine logistique halio-industrielle un modèle de référence pour l'évaluation des résultats de l'implémentation des innovation technologiques digitales dans l'amélioration de la performance globale.

Notre recherche sera scindé en deux parties : dans une première partie, nous allons présenter une revue de littérature des recherches scientifiques relatives au digital supply chain, ses avantages ainsi que l'impact de la digitalisation sur la soutenabilité d'une supply chain. Dans une seconde partie, nous présenterons le modèle conceptuel qui regroupe l'ensemble des propositions de recherche et son application dans la filière halio-industrielle.

2 ANALYSE DE LA REVUE DE LITTERATURE

2.1 Définition de digital supply chain :

La digitalisation se définit comme une innovation technologique qui consiste à transformer des processus traditionnels, des transactions ou des opérations en utilisant des technologies digitales comme le e-commerce, blockchain, les ERP, et la robotique.

L'émergence des innovations technologiques a affecté aussi la chaine logistique qui s'est transformé en digital supply chain(Büyüközkan et Göçer, 2018). L'intégration de la digitalisation a permis d'assurer une meilleure coopération et connectivité entre les acteurs de la chaine logistique ainsi que la traçabilité des produits et ce en utilisant des technologies smart (Kayikci, 2018).

La digitalisation dans la chaine logistique a permis de réagir rapidement et de manière agile suite à la demande du consommateur et de s'adapter rapidement à tout changement (Büyüközkan et Göçer, 2018). Toutefois, l'intégration de la digitalisation dans la chaine logistique n'est pas facile en raison de nombreux défis en termes d'absence de cadre ou de guide pour l'adoption de la digitalisation dans la chaine logistique mais aussi l'absence de partage des informations entre les acteurs de la chaine logistique. Ces obstacles peuvent obstruer les gestionnaires de la supply chain dans leur déploiement des technologies digitales.

2.2 la contribution de la digitalisation dans la sustunabilté d'une chaine logistique.

La digitalisation et la durabilité sont devenues les nouveaux défis de la chaine logistique, pour instaurer une culture plus durable. En effet, la révolution technologique peut améliorer la performance et la productivité de la supply chain tout e respectant les aspects du développement durable.

2.2.1 Du point de vue environnementale :

Ces transformations révolutionnaires aident les entreprises à développer des produits et processus de production écologiques. L'application de l'industrie 4.0 a permis d'optimiser la consommation énergétique et de minimiser les déchets et pertes (Luthra et Mangla, 2018). Certains auteurs ont démontré que la sélection des technologies plus adaptées comme la robotique, les capteurs digitales, les étiquettes RFID ont permis de concevoir et de fabriquer des produits durables mais aussi d'atteindre une production plus élevée tout en assurant une sécurité accrue des aliments (Luthra et Mangla, 2018), (Bhat et Jõudu, 2019)

La digitalisation contribue de manière positive à la préservation de l'environnement (Ait-Daoud,2012). Des systèmes technologiques comme la blockchain et les RFID ont permis d'assurer une traçabilité des produits agroalimentaire en temps réel tout en veillant à respecter les règles de HAACP. Les technologies d'information responsables ont permis de dématérialiser et de numériser les procédures de travail.et à proposer des nouveaux services comme e-administration et le e-payement. Ces nouveaux services permettent la réduction de la consommation du papier, de faciliter les échanges inter-organisations mais aussi de substituer les déplacements et le transport qui génèrent des émission CO2 (Ait-Daoud,2012).

2.2.2 Du point de vue social :

La digitalisation facilite l'accès du consommateur au produit et à l'information grâce à la commande ne ligne et le e-commerce. Donc elle a contribué à l'amélioration du bien être des gens ainsi que de la communauté (Kayikci, 2018) et (Rogetzer et al 2019). La digitalisation a aussi contribué à faciliter les taches et le travail des employés et assurer une meilleure sécurité et ergonomie dans les lieux de travail.

2.2.3 Du point de vue économique :

La digitalisation a contribué à l'amélioration de l'efficacité et l'efficience du système de production (Kayikci, 2018). L'adoption des technologies de digitalisation pour une entreprise et sa chaine logistique affectent leur performance économique. Des technologies comme blockchain peut entrainer une désintermédiation de la chaine logistique en réduisant le nombre des intermédiaires qui interviennent dans cette chaine. Ce qui entraine une réduction du temps et des pertes commerciales et l'accessibilité du produit au moindre coût (Saberi et al , 2019). Ces innovations technologies ont permis d'une part de mieux rassurer les clients en leur fournissant des informations sur l'origine et la traçabilité des produits vert et écologique. D'autre part elles ont permis de garantir la sécurité des données partagées entre les acteurs de la chain logistique, ce qui a pour effet d'accroitre la confiance des clients et leur nombre d'achat.

2.3 Les innovations technologique digitales dans une chaine logistique et leurs impacts durables

L'analyse de la revue de littérature (composée des articles récents [2015- 2020]), nous amène à déduire que l'étude de l'impact des technologies digitales sur la performance durable d'une chaine logistique n'a pas été suffisamment étudiée.

Par conséquent il existe encore des difficultés sur l'utilisation des instruments de mesure de la performance durable. La table 1 résume les principaux impacts durables positifs des technologiques digitales dans un contexte d'une chaine logistique.

Table1 : La Contribution Durable Des Technologies Digitales

Technologies DSC	Description	Impact sur le développement durable	Auteurs
Blockchain	C'est une technologie de stockage et de transmission des informations, qui se caractérise par la transparence et la sécurité des données et des transactions.	***Volet économique :*** -Désintermédiation de la chaine logistique -Garantir la sécurité et l'authencité des données -Assurer la transparence et la fiabilité de l'entreprise ***Volet social :*** -Rassurer le consommateur sur l'éthique des produits achetés. -Renforcer la sécurité des aliments en réduisant les problèmes de contamination grâce à la numérisation du suivi et stockage des enregistrements et informations. -Améliorer la traçabilité et la confiance du consommateur. ***Volet environnemental :*** - Retracer l'empreinte carbone des produits tout en long de la chaine logistique. -Réduire les émissions de carbone dans l'acheminement du produit en fournissant les bases de la cartographie de la chaine.	(Saberi, et al , 2019). (Rogetzer et al,2019). (Bhat et Jõudu, 2019) (Swan,2015) (Chapron,2017 (Korpela et al, 2017)
Technologie de capteur et Internet of things	La technologie des capteurs permet la connexion des objets et produits à condition qu'ils soient équipés avec des capteurs et reliés à des logiciels ou GPS. Cette technologie assure une meilleure interconnexion des différents maillons de la chaine logistique.	***Volet social:*** -Faciliter la tâche des employés dans la détection des produits -L'assurance sur la sécurité des produits ***Volet économique :*** -Assurer un meilleur contrôle des produits dans la chaine de froid - Traçabilité du produit tout en long de la chaine de la chaine logistique ***Volet environnemental :*** - détecter les lots défectueux en cas d'une contamination dans le domaine agroalimentaire -Réduire les pertes de ressources et des énergies.	(Bhat et Jõudu, 2019) (Bhat, 2017) (Rogetzer et al,2019). (Bechtsis et al, 2017) (Davidsson, 2016)
Cobotique	Il s'agit d'une nouvelle forme de robotisation qui intègre l'aspect collaboratif et interactif dans la relation du robot avec l'homme.	***Volet social :*** -Améliorer les conditions de travail, assurer une sécurité aux employés et faciliter leurs tâches. -acceptation des robots et le travail en collaboration avec la machine. ***Volet économique :*** -Optimisation des ressources et des besoins énergétiques -La réutilisation des composantes des produits obsolète dans la chaine de fabrication. ***Volet environnemental :*** - Réduire l'empreinte carbone de la chaîne logistique -Réduire les coûts de stockage grâce au système de juste à temps. -Augmenter la production avec un minimum de rejet	(Luthra et Mangla, 2018) (Dossou,2018) (De Man et Strandhagen, 2017). Mercier-Laurant, 2020) (Pale, 2020) (Houmady et al, 2015)
Big data et Cloud	Désigne un ensemble très volumineux de données qui sont stockées et traitées vie Cloud computing. Dans la SCM, le big data et le cloud ont permis d'exploiter les données partagées et renforcer la collaboration entre les différents acteurs qui interviennent dans la chaine.	***Volet social:*** -La personnalisation des produits et la satisfaction du consommateur. ***Volet économique:*** La transformation des flux tendue en flux poussée ce qui participe à la réduction des déchets et augmente la réactivité de l'entreprise. ***Volet environnemental:*** -la réduction du gaspillage en prédisant la durée de vie des pièces et composants du produit et en précisant les options de récupération dans la chaine logistique.	(Rogetzer et al 2019). (Li et al, 2015) (Ngai et al, 2014)
L'impression 3D et la fabrication additive	Dans la fabrication additive, on additionne les pièces 3D sous contrôle d'un ordinateur sous la forme d'une couche successive.	***Volet environnemental:*** -Réduire les matériaux utilisés dans le produit. -Réduire l'effet négative sur l'environnement. -Diminuer le gaspillage de l'énergie. ***Volet social :*** -Remplacer le manque de la main d'œuvre dont souffre certain pays ***Volet économique :*** Optimiser les délais de production et accélérer le délai de livraison aux clients.	(Rogetzer et al 2019). (Kellens et al, 2017) (Weller et al, 2015)(Ben-Ner et siemsen, 201

Bien que cette nouvelle génération de technologies digitales impactent positivement sur l'ancrage du développement durable, cependant elle ne peut s'échapper de certains effets négatives.

- Les impacts sociaux

. D'une part, le travail en connectivité permanente avec les outils digitaux augmente la perturbation, la pression mais aussi il génère une surcharge informationnelle pour les employés ce qui conduit à l'apparition du « technostress » (valenduc, 2017).

D'autre part, la transformation digitale participe à l'accroissement des inégalités salariales dans la mesure que l'industrie 4.0 nécessite une main d'œuvre hautement qualifiées qui peut s'adapter à l'utilisation de ces technologies digitales, au détriment des employés moins qualifiés et faiblement rémunérés (Degryse, 2016). Dans le même contexte, la robotisation a fini par substituer le capital humain dans plusieurs taches de travail ce qui s'est répercuté sur l'augmentation du chômage mais aussi sur les liens sociaux au milieu du travail.

- Les impacts environnementaux :

Certes la digitalisation et l'écologie présentent des convergences, néanmoins ils s'opposent sur certains aspects.

En effet, l'industrie 4.0 est jugée par certains auteurs (Pochet, 2017) responsable du réchauffement climatique qui présente un grand risque pour l'environnement.

D'une part malgré ses nombreux avantages, les technologies digitales continuent toujours à exploiter intensivement les ressources naturelles et énergétiques générant ainsi des déchets qui polluent l'environnement malgré les alternatifs envisagés en termes des énergies renouvelables. D'autres part, l'industrie 4.0 conduit à la déforestation et le déséquilibre de l'écosystème ce qui s'est répercuté négativement sur la santé humaine (olah et al, 2020).

3 MODELE CONCEPTUEL ET METHDOLOGIE DE TRAVAIL :

3.1 Proposition d'un cadre conceptuel :

Pour répondre à notre problématique de recherche, on s'est basé sur un nombre important de travaux de recherche qui se sont penchés sur l'évaluation de la logistique durable et la digitalisation durable.

Ainsi pour concevoir notre modèle de recherche et afin d'obtenir une approche holistique, on s'est appuyé dans un premier temps sur le modèle proposé par Baumann(2011) qui porte sur l'intégration du développement durable dans chaque processus de la chaine logistique et l'évaluation de son impact sur la performance globale. Pour compléter notre modèle de recherche, on s'est inspiré des modèles de : (Olah et al ,2020), (Bhat et Jõudu, 2019) et (Büyüközkan et Göçer, 2018) qui examinent les impacts des technologies digitales dans une perspective de durabilité.

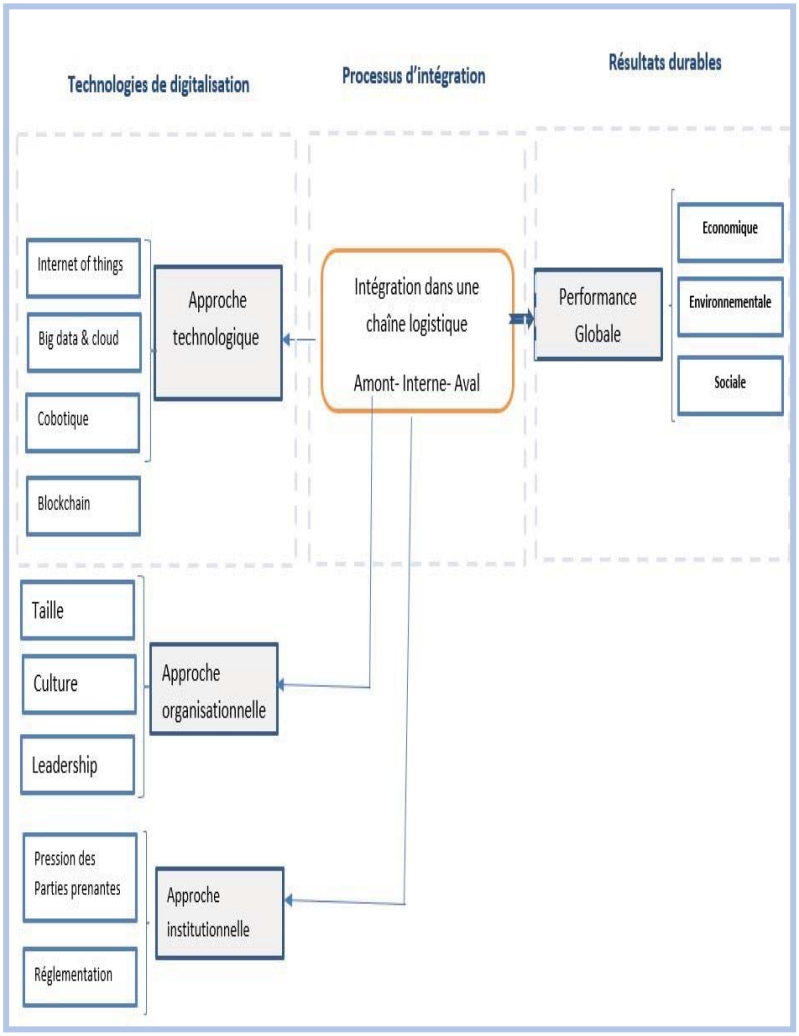


Figure 1. La structure de notre modèle conceptuel

Nous pouvons déduire de ce modèle conceptuel plusieurs propositions de recherches auxquels nous allons les traiter dans le secteur halio-industrielle.

- **Niveau institutionnel :**

Proposition 1 : la pression émanant des parties prenantes influence positivement sur l'adoption de la digitalisation dans une chaine logistique.

- **Niveau organisationnel :**

Proposition 2 : les caractéristiques structurelles de l'entreprise influencent sur l'adoption et la performance de la soutenabilité digitale.

Proposition 3 : le degré d'implémentation des pratiques durables influence sur la performance d'une chaine logistique digitale.

- **Niveau technologique :**

Proposition 4 : l'implémentation de la digitalisation influence sur la performance d'une chaine logistique durable.

3.2 Contexte de l'étude :

Le Maroc s'est engagé dans la démarche de développement durable depuis 2017, par la mise en place de la stratégie Nationale de développement durable (SNDD)

Toutefois, le Maroc n'est pas seulement confronté à des problèmes de durabilité mais aussi à la révolution technologique en matière de digitalisation (de Man et Strandhagen, 2017).
Dans la région de Souss Massa, le secteur de pêche constitue un levier majeur du développement. Cependant il est face à deux défis majeurs : la durabilité et la digitalisation.

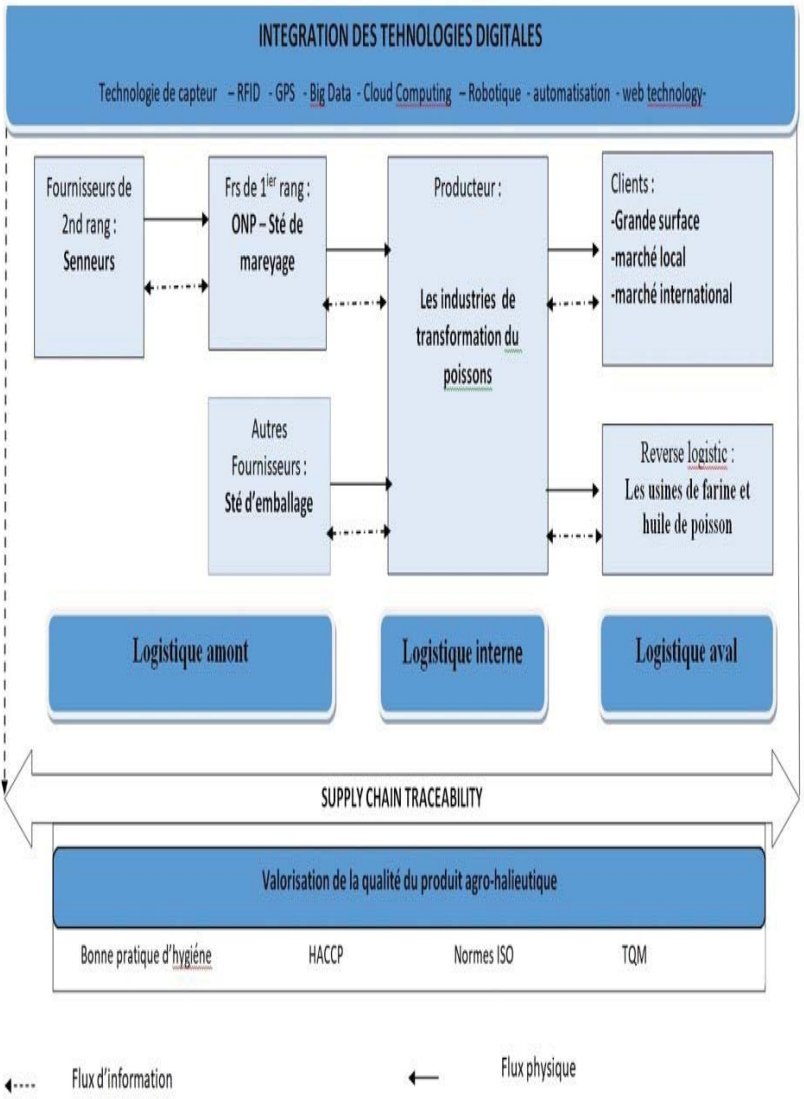


Figure 2. le management durable de la chaîne logistique de la filière halio-industrielle (adapté de Preuss(2005), Bhat et Jõudu (2019) et Aung et Chang(2014)).

3.3 Test du model conceptuel dans le secteur halio-industriel

En vue de tester ces propositions, nous avons mené une étude exploratoire dans le secteur halio-industriel qui reste encore peu exploité à travers la réalisation des entretien semi - directive auprès des acteurs de la chaine logistique.

Proposition 1 : la pression émanant des parties prenantes influence positivement sur l'adoption de la digitalisation dans une chaine logistique.

Les parties prenantes représentés par le ministère de pêche et l'INRH obligent les bateaux de s'équiper de la nouvelle technologie digitale qui est représenté par le VMS. Il s'agit d'un système de surveillance par satellite qui fournie des informations sur la position, le parcours et la vitesse des navires. Cette technologie a permis de garantir une pêche responsable en matière du respect des périodes de repos biologique, mais aussi de détecter les pêches illicites et non réglementaires (INN). En 2015 le ministère de pêche a déclaré 202 procès verbale d'infraction à l'INN contre les bateaux, et ce grâce au contrôle de VMS.

En plus cette technologie a permis d'avoir une base de données sur les pêcheries et le nombre de bateaux existant dans chaque pêcherie ainsi que d'avoir des prévisions sur les quantités de tonnage des espèces en mer ce qui va permettre de mieux préserver les ressources halieutiques.

Proposition 2 : les caractéristiques structurelles de l'entreprise influencent sur l'adoption et la performance de la soutenabilité digitale.

Force est de constater que les caractéristiques structurelles comme la taille de l'entreprise, sa position dans la chaine logistique, ses certifications impactent sur l'engagement de l'entreprise dans des actions et pratiques de développement durable. En effet, plus la taille de l'organisme est important plus son engagement dans le développement durable est fort

Aussi nous avons déduit que les parties prenantes sont les plus engagés dans une stratégie de développement durable.

Au-delà de ce premier constat, d'autres résultats complémentaires émergent de cette étude. En premier lieu, les organismes les plus structurés sont les plus soucieux à mettre en place des innovations technologiques comme outil d'aide pour le déploiement des actions durables. En deuxième lieu les parties prenantes représentés par le ministère de pêche et l'ONP ont instauré un système de digitalisation en faveur des acteurs de la chaine logistique agro-halieutique(SAMACNA), dans le but de renforcer le contrôle du produit halieutique et de répondre aux exigence de développement durable en terme de lutte contre pêche illicite.

Proposition 3 : le degré d'implémentation des pratiques durables influence sur la performance d'une chaine logistique digitale.

Dans le secteur de pêche, on constate que plus l'entreprise est engagée dans une démarche de développement durable, plus son adoption à des innovations digitales est important.

En effet, la digitalisation constitue une solution et opportunité pour les entreprises pour atteindre leur objectif de durabilité. à cet égard, il est intéressant d'observer que certains bateaux dans leur approche de valorisation de leur pêche, peuvent se servir des solutions digitales pour la sélectivité du poisson en mer. Il s'agit des capteurs reliés à un logiciel comme MLD(système de direction des chaluts), ces logiciels fournissent des données sur le type et la quantité existante dans cette zone et permet de réduire ainsi le nombre des rejets et le refoulement des juvéniles.

Au-delà de ce premier constat, des autres actions émergent au niveau de la logistique interne. En effet dans le souci de minimisation des déchets et l'optimisation des ressources halieutiques ainsi qu'énergétique, les usines peuvent automatiser certain processus de fabrication de la conserve de poisson.

Proposition 4 : l'implémentation de la digitalisation influence sur la performance d'une chaine logistique durable.

Le ministère de pêche a instauré un système de traçabilité tout au long de la chaine halio-industrielle, il s'agit du projet Samacna. Ce projet consiste à assurer la traçabilité numérique et la certification des produits halieutiques tout au long de la chaine logistique depuis la déclaration de capture jusqu'à la distribution et l'exportation du produit halio-industriel. En effet, les agents de control du département de pêche maritime sont équipés par un terminal de saisie mobile (Personal digital assistant :PDA) pour saisir les données de la déclaration de capture(DC) et octroyer une étiquette de DC au profit des bateaux. L'office national des pêches procède à la lecture optique du code QR sur l'étiquette pour accéder aux données numériques de la DC. Bien évidement grâce à la digitalisation toute la procédure de commercialisation dans la halle est informatisé : l'identification du poisson, la criée et aussi l'adjudication. Tous ces transactions sont stockés et traité dans le big data et le cloud computing de l'ONP puis transférées dans le big data du ministère de pêche.

La digitalisation constitue un vrai exploit pour l'ONP et le ministère de pêche. Au niveau social, la digitalisation a facilité la tâche de commercialisation pour les employés de l'ONP et rassurer le consommateur sur l'origine de poisson grâce au système de traçabilité. Au niveau économique, elle a procuré un gain de temps considérable et une efficacité dans la procédure de commercialisation du poisson. Au niveau environnemental, elle a permis de rétrécir la durée d'exposition du poisson et de contribuer ainsi de préserver la qualité du poisson.

Au niveau de la logistique interne, on constate que dans la filiére de halio-industrielle certain industriels ont automatisé les ligne de production comme l'étalage, l'éviscération, le sertissage et le dosage du sel. De plus ces unités disposent des stations de traitement des eaux rejetés automatisés qui protège l'environnement. Ces solutions innovantes et digitales ont permis d'accroitre la performance de ces usines en terme d'amélioration de l'ergonomie de travail, d'optimisation des ressources et des énergies et le maintien de la qualité mais aussi en terme d'optimisation des coûts.

Ces dispositifs contribuent à l'amélioration de la compétitivité des acteurs de la filiére halio-industrielle.

4 CONCLUSION

Suite à la révolution industrielle 4.0 , les acteurs de la chaine logistique sont confrontés à de nombreux défis pour rester compétitifs. Toutefois un défi supplémentaire s'ajoute c'est de suivre le contexte mondial en termes de digitalisation tout en respectant les exigences du développement durable. La digitalisation constitue une vraie opportunité pour un avenir durable de la supply chain management.

La principale contribution de ce travail est d'analyser l'impact des innovations digitales sur la durabilité de la chaine logistique et sur sa performance. Ainsi de développer un modèle de référence pour l'évaluation de la performance globale permettant d'accompagner les acteurs de la chaine logistique de la filière halio-industrielle dans la déclinaison de leur démarche de développement durable.

Les résultats obtenus lors de l'étude exploratoire auprès des acteurs de la chaîne logistique halio-industrielle peuvent aboutir à des perspectives intéressantes. Nous envisageons mener une étude empirique qui va nous permettre de transposer notre modèle de recherche dans ce secteur. Et ce afin de mettre à la disposition des chefs d'entreprise un modèle opérationnel qui va leur permettre d'évaluer leur démarche de développement durable.

RÉFÉRENCES

[1] Ait-Daoud, S. (2012). Le management responsable des technologies de l'information (MRTI): entre approches éthique et institutionnelle (thèse de Doctorat, Montpellier 2.

[2] Aung, M. M., & Chang, Y. S. (2014). Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. Food control, Vol 39, pp 172-184.

[3] Baumann,C,E.(2011). Prise en considération des problématiques des chaînes logistiques durables dans les référentiels d'évaluation de performance. Thèse en science d'ingénieur. Lyon :Institut National des Sciences Appliqués,244 p.

[4] Ben-Ner, A., & Siemsen, E. (2017). Decentralization and localization of production: The organizational and economic consequences of additive manufacturing (3D printing). California Management Review, Vol 59(N°2), pp 5-23.

[5] Bhat, R. (Ed.). (2017). Sustainability Challenges in the Agrofood Sector. John Wiley & Sons.

[6] Bhat, R., & Jõudu, I. (2019). Emerging issues and challenges in agri-food supply chain. In Sustainable Food Supply Chains (pp. 23-37). Academic Press.

[7] Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2018). Digital supply chain: literature review and a proposed framework for future research. Computers in Industry, Vol 97, pp 157-177.

[8] Chapron, G. (2017). The environment needs cryptogovernance. Nature News, Vol 545(N°7655), pp 403-405

[9] Davidsson, P., Hajinasab, B., Holmgren, J., Jevinger, Å., & Persson, J. (2016). The fourth wave of digitalization and public transport: Opportunities and challenges. Sustainability, Vol 8(N°12), pp1248.

[10] de Man, J. C., & Strandhagen, J. O. (2017). An Industry 4.0 research agenda for sustainable business models. Procedia Cirp, Vol 63,pp 721-726.

[11] Degryse, C. (2016). Impacts sociaux de la digitalisation de l'économie. Working papers n° 2016.02, Bruxelles, ETUI.

[12] Dossou, P. E. (2018). Impact of Sustainability on the supply chain 4.0 performance. Procedia Manufacturing, Vol 17, pp 452-459.

[13] Hoummady, M., Lemercier, P., & Boisard, A. S. (2015). Evolutions de la logistique à l'horizon 2025: enjeux et impacts du Big data, de l'Intelligence Artificielle et de la Robotisation.

[14] Kayikci, Y. (2018). Sustainability impact of digitization in logistics. Procedia manufacturing, Vol 21,pp 782-789.

[15] Kellens, K., Mertens, R., Paraskevas, D., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2017). Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing?. Procedia CIRP, Vol 61, pp 582-587.

[16] Korpela, K., Hallikas, J., & Dahlberg, T. (2017, January). Digital supply chain transformation toward blockchain integration. In proceedings of the 50th Hawaii international conference on system sciences.

[17] Li, J., Tao, F., Cheng, Y., & Zhao, L. (2015). Big data in product lifecycle management. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 81(N°1-4),pp 667-684.

[18] Luthra, S., & Mangla, S. K. (2018). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. Process Safety and Environmental Protection, Vol 117, pp 168-179.

[19] Mercier-Laurent, E. (2020). Intelligence articielle 4.0 pour l'Industrie 4.0. Bulletin de la Société Informatique de France, pp.127-137.

[20] Ministére,(2017). Projet de la stratégie nationale de développement durable(SNDD) 2030 résumé exécutif, Maroc, 66p.

[21] Ngai, E. W. T., Peng, S., Alexander, P., & Moon, K. K. (2014). Decision support and intelligent systems in the textile and apparel supply chain: An academic review of research articles. Expert Systems with Applications, Vol 41(N°1), pp 81-91.

[22] Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, MA, Haddad, H., et Kitukutha, N. (2020). Impact de l'industrie 4.0 sur la durabilité environnementale. Durabilité , 12 (11), 4674.

[23] PALE, T. (2020). La robotique collaborative.. Promouvoir un outil de développement en jugulant la faiblesse des infrastructures physiques en Afrique. Communication, technologies et développement, (8).

[24] Pochet, P. (2017). Numérique et écologie: comment concilier ces deux récits de l'avenir?. L'Economie politique, (1), 101-112.

[25] Preuss, L(2005). Rhetoric and reality of corporate greening : a view from the supply chain management function. Business strategy and the environnement, N°14, p123-139.

[26] Rogetzer, P., Nowak, T., Jammernegg, W., & Wakolbinger, T. (2019). Impact of Digitalization on Sustainable Supply Chains. In Chancen und Grenzen der Nachhaltigkeitstransformation (pp. 131-144). Springer Gabler, Wiesbaden.

[27] Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. International Journal of Production Research, Vol 57(N°7), pp 2117-2135.

[28] Swan, M. (2015). Blockchain: Blueprint for a new economy. " O'Reilly Media, Inc.".

[29] Valenduc, G. (2017). Au doigt et à l'œil. Les conditions de travail dans des environnements digitalisés. HesaMag, 16, 12-16.

[30] Weller, C., Kleer, R., & Piller, F. T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. International Journal of Production Economics, Vol 164, pp 43-56.

MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING FORMULATION FOR A MULTI-ECHELON INTEGRATED SUPPLY CHAIN WITHIN MASS CUSTOMIZATION STRATEGY

Mouad Benbouja, Achraf Touil, Abdelwahed Echchatbi, Abdelkabir Charkaoui

Hassan First University of Settat, Faculty of Sciences and Technologies, Laboratory of Engineering, Industrial Management and Innovation
Settat, Morocco
mouad.benbouja@gmail.com, ac.touil@uhp.ac.ma, echchatbi@gmail.com, charkaoui.a@gmail.com

ABSTRACT: *Product customization is considered as the widespread strategy for the actual market trend oriented toward customer focus. In this field, mass customization sights mainly to emerge economy of scale and economy of scope in order to integrate mass production principles with customization abilities. This research views the collaborative management approach by developing an integrated procurement, production and distribution mixed integer linear programming (MILP) model for a multi-echelon and multi-site supply chain, the corresponding resolution is performed with an exact method. The studied supply chain consists of leaders and followers relationships as follows, (a) customers: Original Equipment Manufacturers (OEMs) identified as leaders and (b) first-tier suppliers: customized products manufacturers (c) second-tier suppliers: raw material suppliers, identified as followers. Using this MILP, the operations decision-making is focused on the first-tier suppliers, an optimal solution is achieved so as to satisfy the customized demands from the leaders considering the specific characteristics of mass customization environment for the internal and external constraints through the supply chain. The illustration of the model is performed with an example from the automotive industry in addition to a sensitivity analysis to highlight the interdependence between some key parameters and provide managerial insights.*

KEYWORDS: *Multi echelon supply chain, integrated supply chain, mass customization, product variety, mixed integer linear programming (MILP)*

1 INTRODUCTION

The market environment change toward customer focus boasts firms to enhance product customization abilities to remain competitive while improving market share. In fact, consumer preferences rise up product variety level so that product features can fit the highlighted requirements. From supply chain standpoint, it could be perceived as a substantial shift from mass production to mass customization (MC) endeavor. While multiple definition of MC are proposed in the literature, the main understanding is the ability to provide customized products for a mass market (Coletti et Aichner, 2011; Davis, 1990; Pine, 1993). (Candelo, 2019) provided the new market characteristics that promote the switch from mass production to mass customization argued by three main factors of change, namely, the limits of mass production process which requires stable inputs, reduction of market homogeneity and demand instability, these elements depict the fundamental of the economy of scale. Thereupon, the supply chain as a network should encompass the organizational enablers to successfully establish the interrelated processes of production planning and inventory control as well as logistics and distribution (Ballou, 2007). In fact, mass customization is perceived as an operations management perspective due to its impact on the adopted organizational strategies through the supply chain, for example, the rapid and effective integration to record customer requirements and production launch considering delivery time window in addition to the necessity of building a strong customer relationship with customer-supplier framework for the interactions across supply chain actors (Selladurai, 2004). Basically, the adopted customer involvement level in the supply chain which is well known as the customer order decoupling point (CODP) is the principal trigger of the supply chain design for downstream and upstream processes in order to drive value chain stages, namely, design, fabrication, assembly and distribution. The concept is to delay transformation processes as much as possible until customer orders are known. The increased level of customer integration moves the CODP to upstream positions to dump speculation activities on products manufacturing (Budiman et Rau, 2019; Yang et Burns, 2003). Therefore, the adopted postponement strategy by the supply chain highlights the forecast and order-driven attributes while the main purpose is to ensure cost efficiency and customer service level. Moreover, modularity practices for product development is considered as a core structure design to enhance mass customization strategy (Tu et al., 2004). It is worth mentioning that postponement and modularization approaches emphasize achieving the desired business process of scale and scope as modularity contributes for postponement implementation (Mikkola et Skjøtt-Larsen, 2004). As stated by (Blecker & Abdelkafi, 2006), mass customization adoption come through the assessment of some critical implementation factors,

namely, (a) customer demand for customized products (b) market turbulence (c) supply chain readiness (d) knowledge driven organization. The prevailing statement is to ensure firms' capability fulfilment as the implementation necessitates a substantial supply chain actors' alignment to concur the strategic mass customization objectives. Towards that end, supply chain configuration should be addressed with an integrated business process to encompass the generated operations policies. For instance, to cope with manufacturing uncertainties, make to order policy is perceived as a suitable process to preserve the customer value perception on product development. The supply chain planning with pull system reveals a dynamic capability from management perspective where integration abilities enhance information and physical flows across partners according to the required reliability level through upstream and downstream processing capability. As stated by (Liu et Deitz, 2011), the literature on mass customization and supply chain management recognized two value creation management competences that should impact the required capability which are customer focused product design and supplier lead-time reduction. It reflects a major fields to sustain the corresponding planning system approach. (Xu et al., 2017) proposed a decision support model to sustain the economy of scale and scope within mass customization context, the constructed quantitative model allows decision makers to drive the balance between customers' preferences and operational cost.

The supply chain stakeholders need to adhere within collaboration framework in order to drive the cost performance balance through multiple fields. For instance, resources cost efficiency (e.g. inventory, manufacturing), customer service level and internal operations' flexibility to deal with changing environment. In fact, this necessity arises from the interdependency between actors for different patterns where standalone positions will hinder performance. The resulted coordination mechanism attributes aims to foresee decision-making process to enhance the value chain within a high volatile market environment (Jin et al., 2019). One approach widely adopted is supply chain integration of different planning processes such as production, storage and distribution. (Masoud et Mason, 2016) proposed an integrated production and transportation planning problem in the automotive industry for the operational level, the resolution process is formulated with hybrid simulated annealing algorithm employing a constructive heuristic and an effective encoding-decoding strategy. (Rafiei et al., 2018) formulated a four-echelon supply chain for an integrated production-distribution planning problem, two mixed integer linear programming models have been investigated according to no competitive and competitive market, and the elastic constraint method is applied as a resolution approach. (Pasandideh et al., 2015) pointed out the strategic, tactical and planning decision making model for a supply chain network in order to determine, respectively, the number and locations of warehouses, transportation channels assigning in addition to production management. For this field, a bi-objective mixed-integer non-linear mathematical formulation has been proposed and solved with non-dominated sorting genetic algorithm and non-dominated ranking genetic algorithm. (Touil et al., 2019) addressed a mixed integer linear programming model for an integrated production and distribution problem considering different uncertainty sources. The credibility theory is carried out for a constructive framework to cope with uncertainties and the extreme cases of the optimistic and pessimistic criteria are handled with Hurwicz criterion which attempts to drive a balance in order to maximize profit.

To the best of our knowledge, there is a lack of mass customization studies with the perspective of an integrated supply chain mathematical modeling through MILP formulation. This paper aims to fill this gap and propose a MILP formulation for modeling a multi-echelon, multi-site integrated procurement, production and distribution supply chain within mass customization environment while minimizing the total cost. The tactical decision planning architecture is adopted to draw the root assumptions classes. The motivation of this study arises from first-tier suppliers' interactions with main contractors within demand driven supply chain. The illustration of the empirical application from industrial case is the leader and followers dyadic relationships across the automotive industry. The integration aspect sights to evolve the dynamic capability underpinning for mass customization enablers outlined mainly through product design with modularity concepts as well as postponement and the corresponding CODP in order to address a triggered supply chain according to make to order production policy.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 provides the model formulation and the adopted assumptions. Section 3 presents the case study in addition to the results of the computational experiments. A sensitivity analysis with managerial insights is considered in section 4, followed by the conclusion in section 5.

2 MODEL FORMULATION

The supply chain being studied in this paper is a multi-echelon, multi-site integrated procurement, production and distribution at tactical decision-making level, the automotive industry is considered as an illustration. The multi-echelon supply chain architecture is (a) customers: OEMs (b) first-tier suppliers: wiring harnesses manufacturers (c) second-tier suppliers: raw material suppliers, as stated in figure 1.

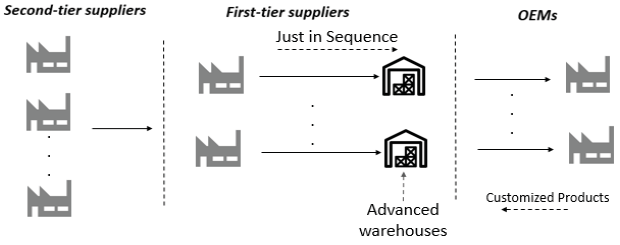


Figure 1: Supply chain structure

The provided demand information with customized orders are transferred from OEMs to the first-tier suppliers as well as the agreed capacity level between different stakeholders. In the studied case, customer involvement (i.e. CODP) occurs at product features definition level with configurator tools as example, the corresponding position of customization degree is known as customized standardization (Um et al., 2017). The OEMs propose a set of options for a vehicle model while customers afford the ability to customize their cars to fit their own needs. Whereby, product modularity approach is applied, the assignment is based on basic modules to include common elements and optional modules for preferences as represented in figure 2.

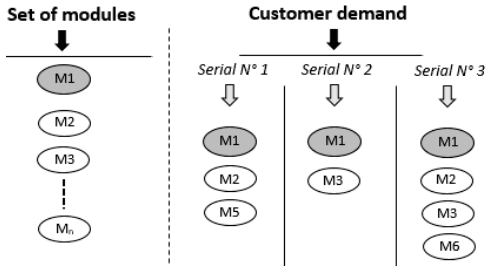


Figure 2: Modular product

In the studied case, the option preferences are addressed through penetration rate shared previously by customers (i.e. OEMS) to assess the percentage of products (i.e. wire harnesses) that will include this option. The postponement level is carried out with make to order mode triggered by confirmed orders reception. As the focus of this supply chain is on the first-tier suppliers operations, the heterogeneous lead times from their different raw material suppliers have an important leverage on production function. Thus, the procurement system is based on the previously shared forecasts from OEMs. Therefore, production and procurement systems are based respectively on confirmed and forecasted demand. The product storage capacity for the first-tier suppliers has a limited behavior, the main storage locations are the advanced warehouses placed generally close to OEMs. Thus, supplier logistic window (i.e. between first-tier suppliers and OEMs) addresses three main timeframe stages as described in figure 3 (i.e. total time in manufacturing sites, total transport time, safety stock).

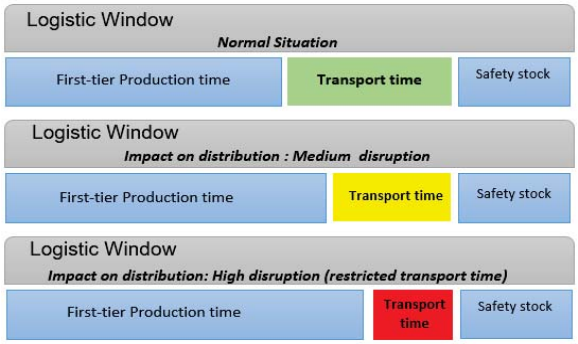


Figure 3: Mass customization logistic window

The key figure outlines that in spite of disruptions, it is mandatory to preserve just in sequence deliveries (i.e. according to make to order), which led to highly cost expected solutions (e.g. premium freight). The mentioned finish good safety stock provides a restricted buffer level. The adopted model assumptions are presented as follows:

Model assumptions:

- Customer demands are handled by confirmed and forecasted demands
- Customized demands approach is ensured by serial numbers for each product. Each serial number represents the product content in terms of the chosen modules by the customer (figure 2). The total number of the series depend on the received demand for each product at each period
- Products inventory holding cost are set independently of their content in terms of modules
- The manufacturing sites have a limited production and storage capacities
- Production shortage in manufacturing sites can happen with backorders form, lost sales are not allowed
- The advanced warehouses charge an inventory holding cost to manufacturing sites
- Product storage capacity at the advanced warehouses is limited for each sites. However, an overstock can be adopted with penalty cost
- Raw material inventory management is performed with (s,S) policy
- Transportation is outsourced, there is not limit for vehicles availability between nodes while vehicles' capacity is considered
- Uncertainty on the received raw material quantity and the delivered products is not considered

The following list presents the model notation including indexes, parameters and decision variables.

Indexes and sets

$t \in T$	Set of time period
$o \in O$	Set of customers (OEM)
$e \in E$	Set of manufacturing sites
$v \in V$	Set of advanced warehouses (AW)
$p \in P$	Set of product families
$s \in S$	Set of serial numbers
$m \in M$	Set of modules
$c \in C$	Set of raw material
$f \in F$	Set of raw material suppliers

Parameters

- **Sales**

$DR_{o,e,p,t}$	Real demand of product p received from customer o to the site e in period t
$DF_{o,e,p,t}$	Forecasted demand of product p received from customer o to the site e in period t
$D^{min}_{o,e,p,t}$	Minimum demand quantity contracted

with customer o and the site e of product p in period t

PR_m Penetration rate of the module m

$PSF0_{o,e,p,s,t}$ Auxiliary parameter = 1 to activate the serial number s of the forecasted demand of product p of the customer o for the site e at period t

$PSF1_{o,e,p,s,m,t}$ Auxiliary parameter = 1 to activate the module m that belongs to the serial number s of the forecasted demand of product p of the customer o for the site e at period t

$PSR0_{o,e,p,s,t}$ Auxiliary parameter = 1 to activate the serial number s of the real demand of product p of the customer o for the site e at period t

$PSR1_{o,e,p,s,m,t}$ Auxiliary parameter = 1 to activate the module m that belongs to the serial number s of the real demand of product p of the customer o for the site e at period t

- **Production**

$BO0_{o,e,p,s}$ Initial backorder level at the site e of product p with serial number s of the customer o

$BOC_{o,e,p,s,t}$ Backorder cost at the site e of the product p with serial number s of the customer o at the period t

$IHPS_{o,e,p,t}$ Inventory holding cost at the site e of product p of the customer o in period t

$IPS0_{o,e,p}$ Initial inventory level in the site e of product p of the customer o

$PE^{\max}_{o,e,p,t}$ Maximum storage capacity at the site e of product p of the customer o in the period t

$PQ^{\max}_{o,e,p,t}$ Maximum production capacity at the site e of product p of the customer o in the period t

$PQ^{\min}_{o,e,p,t}$ Minimum production capacity at the site e of product p of the customer o in the period t

MCS_m The cost of module m

- **Procurement**

PC_c Purchase price of component c

$ICS0_{e,c}$ Initial inventory level of raw material c in the site e

$QF^{\min}_{f,e,c}$ Minimum contracted demand between supplier f and the site e for raw material c

$QF^{\max}_{f,e,c}$ Maximum contracted demand between supplier f and the site e for raw material c

$H_{f,e,c,t}$ Parameter = 1, if replenishment from supplier f to the site e of raw material c in period t is allowed and 0 otherwise

$\alpha_{c,m}$ The needed quantity of raw material c in module m (Bill of material)

LT_c Lead time for the raw material c

- **Distribution**

$IHPV_{o,v,p,t}$ Inventory holding cost at the advanced warehouse v of product p of the customer o in period t

$IPV0_{o,v,p}$ Initial inventory level at the advanced warehouse v of product p of the customer o

$PNC_{o,v,p,t}$ Penalty cost of excess inventory at the advanced warehouse v of product p of customer o in period t

$TLV_{e,v}$ Vehicle load capacity from the site e to the advanced warehouse v

$C^{\max}_{o,v,p,t}$ Maximum contracted capacity at the advanced warehouse v for the product p of the customer o at period t

$TLO_{o,v}$ Vehicle load capacity from the advanced warehouse v to the customer o

$CTV_{e,v,t}$ Vehicle trip cost from the site e to the advanced warehouse v in period t

$CTO_{o,v,t}$ Vehicle trip cost from the advanced warehouse v to the customer o in period t

M Big M

Decision variables

- **Production**

$XQT_{o,e,p,s,t}$ Total produced quantity in the site e of product p with serial number s for the customer o in period t

$XQD_{o,e,p,s,t}$ Binary variable, =1 if the serial number s of the product p of the customer o is produced in the site e at the period t to fulfill the real demand, 0 otherwise

$XQB_{o,e,p,s,t}$ Binary variable, =1 if the serial number s of the product p of the customer o is produced in the site e at the period t to fulfill the generated backorder, 0 otherwise

$BO_{o,e,p,s,t}$ Binary variable, =1 if the serial number s of the product p of customer o is backordered in the site e at the period t, 0 otherwise

$IPS_{o,e,p,t}$ Inventory level in the site e of product p of the customer o in period t

$CSD_{e,c,t}$ Consumption level of the raw material c in the site e at period t from the produced quantity to satisfy demand

$CSB_{e,c,t}$ Consumption level of the raw material c in the site e at period t from the produced quantity to satisfy backorders

$CST_{e,c,t}$ Total consumption level of the raw material c in the site e at period t

- **Procurement**

$ICS_{e,c,t}$ Inventory level in the site e of component c at the period t

$QS_{f,e,c,t}$ Purchased quantity by the site e of raw material c from supplier f in period t

$CRQ_{e,c,t}$ Required quantity assessment of raw material c for the site e in period t

$BS_{e,c,t}$ Net required quantity to purchase of raw material c by the site e in period t

- **Distribution**

$IPV_{o,v,p,t}$ Inventory level of product p of the customer o in period t at the advanced warehouse v

$QO_{o,v,p,t}$ Shipping quantity of product p from the advanced warehouse v to the customer o in period t

$QV_{o,e,v,p,t}$ Shipping quantity of product p of the customer o from the site e to the advanced warehouse v in period t

$TRV_{e,v,t}$ Number of vehicle trips from the site e to the advanced warehouse v in period t

$TRO_{o,v,t}$ Number of vehicle trips from the advanced warehouse v to the customer o in period t

$GPL_{o,v,p,t}$ The exceeded storage level at the advanced warehouse v of product p of the customer o in period t

$Y_{o,v,p,t}$ Binary variable, =1 if there is no storage excess at the advanced warehouse v of product p of the customer o in period t, 0 otherwise

$ZO_{o,v,p,t}$ Auxiliary variable for maximum function linearization

Using the previously notation, the MILP model is presented as follows:

Objective function:

The main objective of the proposed model is to minimize the total cost of the supply chain simultaneously. It includes various cost elements as shown in the objective function (1), each component is defined from (2) to (10) to highlight the cost of production, raw material holding cost, product inventory holding cost in the manufacturing sites, product inventory holding cost at the advanced warehouses, the penalty cost of the overstock at the advanced warehouses, procurement cost of raw materials, transportation cost consisting of vehicles utilization and backorder cost.

$$\text{Min: TC} = (\text{TP} + \text{TS0} + \text{TS1} + \text{TS2} + \text{TS3} + \text{TD0} + \text{TD1} + \text{TD2} + \text{TB}) \quad (1)$$

$$\text{TP} = \sum_{t\in T}\sum_{o\in O}\sum_{e\in E}\sum_{p\in P}\sum_{s\in S}\sum_{m\in M} XQD_{o,e,p,s,t} * PSR1_{o,e,p,s,m,t} * MCS_m + \sum_{t\in T}\sum_{o\in O}\sum_{e\in E}\sum_{p\in P}\sum_{s\in S}\sum_{m\in M} XQB_{o,e,p,s,t} * PSR1_{o,e,p,s,m,t-1} * MCS_m \quad (2)$$

$$TS_0 = \sum_{t\in T}\sum_{e\in E}\sum_{c\in C} ICS_{e,c,t} * PC_c \quad (3)$$

$$\text{TS}_1 = \sum_{t\in T}\sum_{o\in O}\sum_{e\in E}\sum_{p\in P} \text{IHPS}_{o,e,p,t} * \text{IPS}_{o,e,p,t} \quad (4)$$

$$TS_2 = \sum_{t\in T}\sum_{o\in O}\sum_{v\in V}\sum_{p\in P} IHPV_{o,v,p,t} * IPV_{o,v,p,t} \quad (5)$$

$$TS_3 = \sum_{t\in T}\sum_{o\in O}\sum_{v\in V}\sum_{p\in P} PNC_{o,v,p,t} * GPL_{o,v,p,t} \quad (6)$$

$$TD_0 = \sum_{t\in T}\sum_{f\in F}\sum_{e\in E}\sum_{c\in C} PC_c * QS_{f,e,c,t} \quad (7)$$

$$TD_1 = \sum_{t\in T}\sum_{e\in E}\sum_{v\in V} CTV_{e,v,t} * TRV_{e,v,t} \quad (8)$$

$$TD_2 = \sum_{t\in T}\sum_{o\in O}\sum_{v\in V} CTO_{o,v,t} * TRO_{o,v,t} \quad (9)$$

$$TB = \sum_{t\in T}\sum_{o\in O}\sum_{e\in E}\sum_{p\in P}\sum_{s\in S} BOC_{o,e,p,s,t} * BO_{o,e,p,s,t} \quad (10)$$

Production

In order to fulfill customers' demand on each manufacturing site, constraint 11 represents the total production $XQT_{o,e,p,s,t}$ which is performed by two parts. $XQD_{o,e,p,s,t}$ denotes production to cover the real demands (i.e. confirmed demand), while $XQB_{o,e,p,s,t}$ represents the fulfillment of the previously generated backorders, in the period t=1 it is equal to 0 as stated by constraint 12:

$$XQT_{o,e,p,s,t} = XQD_{o,e,p,s,t} + XQB_{o,e,p,s,t}, \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, \forall s \in S, t > 1 \quad (11)$$

$$XQB_{o,e,p,s,t} = 0, \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, \forall s \in S, t = 1 \quad (12)$$

Constraint 13 defines the backordered products and those to produce. This definition is established from the received demand which is expressed by serial numbers for each product family (i.e. define the serial numbers to produce or to backorder for an upcoming production):

$$XQD_{o,e,p,s,t} = \text{PSR0}_{o,e,p,s,t} - BO_{o,e,p,s,t} \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, s \leq DR_{o,e,p,t}, t \in T \quad (13)$$

Constraint 14 ensures the production capacity of each manufacturing sites:

$$\sum_s^S XQT_{o,e,p,s,t} \leq PQ_{o,e,p,t}^{\max} \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, t \in T \quad (14)$$

Constraint 15 holds the backorder hurdle that should be less than a defined percentage δ from the confirmed demand during each period:

$$\sum_s^{DR_{o,p,t}} BO_{o,e,p,s,t} \leq \delta \cdot DR_{o,e,p,t} \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, t \in T \quad (15)$$

In order to handle the production of backorders, constraint 16 aims to settle it during two periods. Thus, the backordered serial numbers could be produced at either t+1 or t+2. Constraint 17 defines the maximum threshold of backorders production. Constraint 18 and 19 aim to define the backorder treatment during the last period, it has been set to 0 while ensuring the complete production of the generated backorders at the period T-1. At last, as stated by constraint 20, the total generated backorders over the horizon have to be produced completely.

$$\sum_{q=t+1}^{q=t+2} XQB_{o,e,p,s,q} = BO_{o,e,p,s,t} \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, \forall s \in S, \forall t \in T-1 \tag{16}$$

$$\sum_{s \in S} XQB_{o,e,p,s,t} \leq PQB^{\max}_{o,e,p,t} \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, \forall s \in S, \forall t \in T-1 \tag{17}$$

$$BO_{o,e,p,s,t} = 0 \ , \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, s \in S \ , t = T \tag{18}$$

$$XQB_{o,e,p,s,t} = BO_{o,e,p,s,t-1}, \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, s \in S \ , t = T \tag{19}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} BO_{o,e,p,s,t} = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} XQB_{o,e,p,s,t} \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P \tag{20}$$

Constraint 21 illustrates production and distribution decisions of the manufactured products for each site through the inventory balance flow. It is given by the inventory from the last period plus the realized production minus the shipped quantity to the advanced warehouses:

$$IPS_{o,e,p,t} = IPS_{o,e,p,t-1} + \sum_{s \in S} XQT_{o,e,p,s,t} - \sum_{v \in V} QV_{o,e,v,p,t} \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, \forall e,v \in E \cap V, \forall t \in T \tag{21}$$

Constraint 22 shows that product's storage capacity in the manufacturing sites has a limited threshold:

$$IPS_{o,e,p,t} \leq PE^{\max}_{o,e,p,t} \ , \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, \forall t \in T \tag{22}$$

Distribution

Constraint 23 calculates the number of vehicle trips from each manufacturing site to the advanced warehouses at every time period based on vehicles' capacity:

$$TRV_{e,v,t} \leq \frac{\sum_{o \in O} \sum_{p \in P} QV_{o,e,v,p,t}}{TLV_{e,v}} \quad \forall e,v \in E \cap V, \forall t \in T \tag{23}$$

Constraint 24 conserves the flow at the advanced warehouses. It indicates the available inventory of product families in each period, which is the reported inventory from the previous period plus the received quantity from manufacturing sites minus the shipped quantity to customers:

$$IPV_{o,v,p,t} = IPV_{o,v,p,t-1} + \sum_{e \in E} QV_{o,e,v,p,t} - QO_{o,v,p,t}, \quad \forall o,v,p \in O \cap V \cap P, \forall t \in T \tag{24}$$

Constraint 25 outlines the restricted minimum quantity to be delivered to customers for each period. Moreover, constraint 26 describes the number of vehicle trips from the advanced warehouses to customers at every time period based on vehicles' capacity:

$$\sum_{v \in V} QO_{o,v,p,t} \geq \sum_{e \in E} D^{min}_{o,e,p,t} \quad \forall o,e \in O \cap E, \forall v,p \in V \cap P, \forall t \in T \tag{25}$$

$$TRO_{o,v,t} \leq \frac{\sum_{p \in P} QO_{o,v,p,t}}{TLO_{o,v}} \quad \forall o,v,p \in O \cap V \cap P, \forall t \in T \tag{26}$$

Constraint 27 shows that there is a safety stock (i.e. buffer) level to maintain at the advanced warehouses, it is established according to a percentage from the confirmed demand presented here by β:

$$IPV_{o,v,p,t} \geq \beta * \sum_{e \in E} DR_{o,e,p,t} \quad \forall o,v,p \in O \cap V \cap P, \forall t \in T \tag{27}$$

As discussed previously, to express the inventory level agreement between manufacturing sites and the advanced warehouses, the overstock from the contracted limit is accepted. Though, a penalty cost is applied for the additional volume. Constraint 28 highlights the difference between the inventory level and the maximum contracted capacity:

$$GPL_{o,v,p,t} = Max\{(IPV_{o,v,p,t} - C^{\max}_{o,v,p,t}); 0\} \quad \forall, o \in O, p \in P, v \in V, t \in T \tag{28}$$

In order to cope with the nonlinearity generated by the previous maximum function, constraints 29, 30, and 31 are added to the mathematical model:

$$GPL_{o,v,p,t} \geq IPV_{o,v,p,t} - C^{\max}_{o,v,p,t} \quad \forall o,v,p \in O \cap V \cap P, \forall t \in T \tag{29}$$

$$GPL_{o,v,p,t} \leq IPV_{o,v,p,t} - C^{\max}_{o,v,p,t} + M * Y_{o,v,p,t} \quad \forall o,v,p \in O \cap V \cap P, \forall t \in T \tag{30}$$

$$PL_{o,v,p,t} \leq M * (1 - Y_{o,v,p,t}) \quad \forall o,v,p \in O \cap V \cap P, \forall t \in T \tag{31}$$

Procurement

Constraint 32 ensures the balance equation of raw material inventory in manufacturing sites. It is equal to the inventory level from the previous period plus the received quantity from raw material suppliers in period t minus the consumed quantity in the sites:

$$ICS_{e,c,t} = ICS_{e,c,t-1} + \sum_{f \in F} QS_{f,e,c,t+LT_c} + CST_{e,c,t} \quad \forall c \in C, e \in E, t < T - LT_c \tag{32}$$

In order to assess the raw material consumption, constraints 33 and 34 aim to determine the consumed level depicted from production structure (i.e. demand and backorders fulfilment) using the consumption coefficient of each module. Constraint 35 comes to add up the total consumption:

$$CSD_{e,c,t} = \sum_{o\in O}\sum_{p\in P}\sum_{s\in S} XQD_{o,e,p,s,t} * \sum_{m\in M} PSR1_{o,e,p,s,m,t} * \alpha_{c,m} \quad \forall c \in C, e \in E, t \in T \quad (33)$$

$$CSB_{e,c,t} = \sum_{o\in O}\sum_{p\in P}\sum_{s\in S} XQB_{o,e,p,s,t} * \sum_{m\in M} PSR1_{o,e,p,s,m,t-1} * \alpha_{c,m} \quad \forall c \in C, e \in E, t \in T \quad (34)$$

$$CST_{e,c,t} = CSD_{e,c,t} + CSB_{e,c,t} \quad \forall c \in C, e \in E, t \in T \quad (35)$$

Constraint 36 calculates the required quantity for each raw material based on the forecasted demand. Afterwards, constraint 37 aims to define the net required quantity by subtracting the inventory level of the previous period:

$$\mathrm{CRQ}_{e,c,t} = \sum_{q=t}^{q=t+LT_c}\sum_{o\in O}\sum_{p\in P}\sum_{s\in S}\sum_{m\in M} PSF1_{o,e,p,s,m,q} \cdot \alpha_{c,m}, \quad \forall o,e,p \in O \cap E \cap P, \forall c \in C, \forall t < T - LT_c \quad (36)$$

$$BS_{e,c,t} \geq CRQ_{e,c,t} - ICS_{e,c,t-1} \quad \forall c \in C, e \in E, t \in T \quad (37)$$

Constraints 38 and 39 control the purchased quantity based on the net required quantity assessment or the minimum contracted level contracted with raw material suppliers. The policy of the replenishment frequency contracted with suppliers is controlled by the parameter $H_{f,e,c,t}$. It is outlined by a binary matrix while the purchased quantity variable is activated when it has a true value (i.e. $H_{f,e,c,t}$=1). Constraint 40 enforces the activation of the purchased quantity variable according to the matrix value:

$$QS_{f,e,c,t+LT_c} \geq BS_{e,c,t} \cdot H_{f,e,c,t} \quad \forall f,c,e \in F \cap C \cap E, \forall t < T - LT_c \quad (38)$$

$$QS_{f,e,c,t+LT_c} \geq QF^{\min}_{f,e,c} \cdot H_{f,e,c,t} \quad \forall f,c,e \in F \cap C \cap E, \forall t < T - LT_c \quad (39)$$

$$QS_{f,e,c,t+LT_c} \leq M \cdot H_{f,e,c,t} \quad \forall f \in F, c \in C, e \in E, \forall t \in T \quad (40)$$

The raw material supply capacity is represented by constraint 41:

$$QS_{f,e,c,t+LT_c} \leq QF^{\max}_{f,e,c} \quad \forall f,c,e \in F \cap C \cap E, \forall t < T - LT_c \quad (41)$$

Furthermore, the inventory control is performed considering a safety stock level for each raw material. In fact, (Hernandez-Ruiz et al., 2016) proposed an evaluation development to cope with demand variability for modular product structure based on normal distribution of demand in addition to their independency. Constraint 42 represents the adopted expression for the studied case where K reflects a safety factor, t is the inverse cumulative normal distribution coefficient for a target service level highlighting the decision makers' willingness to cope with demand variability:

$$ICS_{e,c,t} \geq K * \left(\sqrt{\sum_{p\in P}\sum_{m\in M} PR_m * \alpha_{c,m} * \sigma_p^2}\right) * \sqrt{LT_c} \quad \forall e \in E, c \in C, t \in T \quad (42)$$

3 NUMERICAL RESULTS

In this section, a numerical experiment is conducted to validate the proposed model and illustrate its application. The considered example consists of 3 customers, 3 manufacturing sites, 3 advanced warehouses and 6 product families with a cluster of 102 modules. The bill of material structure of all modules includes a set of 670 raw material. The stakeholders' linkage in addition to products and modules assignment are presented in table 1. Real and forecasted demands are computed according to the normal distribution while optional module preferences are generated with the uniform distribution. After a defined level of customer demand for each product and each period, a corresponding number of series is generated accordingly which is a substantial contribution for mass customization context in order to ensure the traceability of the customized demand. The optional modules affectation to these series depends on their penetration rate. The model planning horizon is assumed to be 10 periods. Due to different possible configurations, the product inventory holding cost at different locations has been set to an average cost. The initial level of backorders and product inventory is set to zero. Besides, the transportation cost between the partners is considered as a fixed one. According to the raw material safety stock to ensure at the first-tier suppliers, the corresponding customer service level in this study has been set to 95% which gives K=1,65. Furthermore, the raw material purchase costs have been generated randomly between 0,05 and 12. Subsequently, they are used to define the modules' costs according to their bill of materials. Table 2 provides a summary of numerical input data.

The resolution is performed with exact approach. The model is programmed and solved with GAMS 22.5/CPLEX 12.2 optimization software and all numerical experiments are processed with a Core i5 2.49 GHz computer with 8 GB RAM. The presented data set provides feasible solution after a runtime of 2,29 min. Table 3 presents the generated real demand. The total of the backordered serial numbers for each product is presented in table 4. Table 5 presents a detailed example of the backordered serial numbers for product p4 in the period t=7 for the site e =2. The tables 6,7,8 provide a summary of the numerical results for the production quantity for each product, the product inventory level at the advanced warehouses and the corresponding excess perceived during each period. The cost structure of the resolution status is presented in figure 4.

As a global analysis of the results, for instance, the final product flow, it could be perceived that in spite of adopting a maximum hurdle inventory at the plants, the model tends to ensure the buffer at the advanced warehouses.

This status is also triggered by the applied inventory holding costs' parameters, where the cost at the plants ($IHPS_{o,e,p,t}$) is greater than the one at the advanced warehouses ($IHPV_{o,v,p,t}$). Moreover, we can recognize that products inventory cost at the plants is nil which represents the model orientation to foster deliveries to the advanced warehouses with just in sequence.

Customer	Manufacturing site	Advanced warehouse	Product	Range of Modules	Basic Module
o_1	e1	v_1	p_1	M01 -> M17	M01
			p_2	M18 -> M35	M18
o_2	e2	v_2	p_3	M36 -> M53	M36
			p_4	M54 -> M71	M54
o_3	e3	v_3	p_5	M72 -> M89	M72
			p_6	M90 -> M102	M90

Table 1: Affectations of OEMs

Parameters			
Parameter	Value range	Parameter	Value range
$DR_{o,e,p,t}$	N(300;50)	$PQ^{max}_{o,e,p,t}$	500
$DF_{o,e,p,t}$	N(300;50)	$PQ^{min}_{o,e,p,t}$	U(150;180)
$ICS0_{e,c}$	U(1000;1100)	$D^{min}_{o,e,p,t}$	150
PC_c	U(0,05;12)	PR_m	U(0,05;0,9)
$QF^{min}_{f,e,c}$	U (500;700)	$QF^{max}_{f,e,c}$	U (45000;55000)
$BOC_{o,p,s,t}$	5	$H_{f,e,c,t}$	1
$CPO_{o,v,p,t}$	4	$IHPS_{o,e,p,t}$	200
$CPV_{o,v,p,t}$	10	$IPV0_{o,v,p}$	0
$IHPV_{o,v,p,t}$	100	$IPS0_{o,e,p}$	0
$BO0_{o,e,p,s}$	0	$TLO_{o,v}$	50
$TLV_{e,v}$	50	$CTV_{e,v,t}$	500
$CTO_{o,v,t}$	150	$C^{max}_{o,v,p,t}$	50
$PE^{max}_{o,e,p}$	50	$PNC_{o,v,p,t}$	150
LT_c	[1,2,3]	-	-

Table 2 : Model parameters

			t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
o1	**e1**	**p1**	303,55	293,86	211,97	299,94	284,23	285,27	243,37	238,78	297,18	307,34
o1	**e1**	**p2**	269,76	364,70	290,28	338,88	271,65	317,55	268,37	305,43	175,92	324,97
o2	**e2**	**p3**	330,10	235,95	264,66	223,80	288,81	247,15	230,03	223,01	254,25	270,22
o2	**e2**	**p4**	264,17	291,69	258,53	287,91	270,92	249,10	254,03	311,45	300,77	269,33
o3	**e3**	**p5**	374,51	382,91	213,48	359,20	401,02	303,70	251,31	322,42	303,38	246,81
o3	**e3**	**p6**	334,82	354,86	268,70	253,28	236,67	336,57	310,81	280,92	242,67	289,21

Table 3 : Confirmed demand $DR_{o,e,p,t}$

			t2	t4	t6	t7	t8
o1	**e1**	**p1**	28		14	24	
o1	**e1**	**p2**		30		26	30
o2	**e2**	**p3**				5	22
o2	**e2**	**p4**				7	31
o3	**e3**	**p5**	30		30	3	20
o3	**e3**	**p6**			30	10	14

Table 4 : Total backorders for each product from $XQB_{o,e,p,s,t}$

				t7
o2	**e2**	**p4**	**s35**	1
o2	**e2**	**p4**	**s41**	1
o2	**e2**	**p4**	**s42**	1
o2	**e2**	**p4**	**s43**	1
o2	**e2**	**p4**	**s44**	1
o2	**e2**	**p4**	**s45**	1
o2	**e2**	**p4**	**s46**	1

Table 5: Example of backordered serial numbers

			t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
o1	**e1**	**p1**	303	265	211	299	284	271	219	238	297	307
o1	**e1**	**p2**	269	364	290	308	271	317	242	275	175	324
o2	**e2**	**p3**	330	235	264	223	288	247	225	201	254	270
o2	**e2**	**p4**	264	291	258	287	270	249	247	280	300	269
o3	**e3**	**p5**	374	352	213	359	401	273	248	302	303	246
o3	**e3**	**p6**	334	354	268	253	236	306	300	266	242	289

Table 6 : Total produced quantity to satisfy demand from $XQD_{o,e,p,s,t}$

			t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
o1	**v1**	**p1**	60,71	58,77	42,39	59,99	56,85	57,05	48,67	47,76	59,44	61,47
o1	**v1**	**p2**	53,95	72,94	58,06	67,78	54,33	63,51	53,67	61,09	35,18	64,99
o2	**v2**	**p3**	66,02	47,19	52,93	44,76	57,76	49,43	46,01	44,60	50,85	54,04
o2	**v2**	**p4**	52,83	58,34	51,71	57,58	54,18	49,82	50,81	62,29	60,15	53,87
o3	**v3**	**p5**	74,90	76,58	42,70	71,84	80,20	60,74	50,26	64,48	60,68	49,36
o3	**v3**	**p6**	66,96	70,97	53,74	50,66	47,33	67,31	62,16	56,18	48,53	57,84

Table 7 : Inventory level at the advanced warehouse $IPV_{o,v,p,t}$

			t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
o1	**v1**	**p1**	10,71	8,77		9,99	6,85	7,05			9,44	11,47
o1	**v1**	**p2**	3,95	22,94	8,06	17,78	4,33	13,51	3,67	11,09		14,99
o2	**v2**	**p3**	16,02		2,93		7,76				0,85	4,04
o2	**v2**	**p4**	2,83	8,34	1,71	7,58	4,18		0,81	12,29	10,15	3,87
o3	**v3**	**p5**	24,90	26,58		21,84	30,20	10,74	0,26	14,48	10,68	
o3	**v3**	**p6**	16,96	20,97	3,74	0,66		17,31	12,16	6,18		7,84

Table 8 : Excess inventory at the advanced warehouse $GPL_{o,v,p,t}$

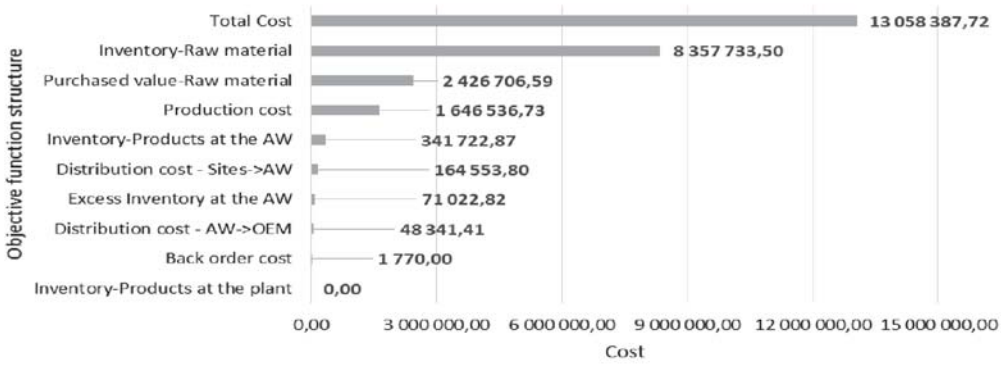


Figure 4: Objective function-Cost summary

4 SENSITIVITY ANALYSIS AND MANAGERIAL INSIGHTS

In order to explore the quality of the proposed solutions, a sensitivity analysis is performed for some key parameters from the initial nominal value. The improvement of the given right-hand side (RHS) input data highlights a deep correlation with decision-making process, for instance, those related to capital investment or manpower decisions for the capacity allocation provided in the model by $PQ^{max}_{o,e,p,t}$. Therefore, a local sensitivity analysis according to the one-at-a-time method (OAT) is carried out through 3 scenarios while decreasing the upper bound region in order to analyze the optimality resolution behavior of the model (Borgonovo et Plischke, 2016). In fact, 3 instances have been launched with the same demand range while decreasing the capacity level. Table 9 describes the shifting percentage from the base case to the sensitivity case with the corresponding optimality resolution status. Figure 5 presents the resulted influence for each instance on the objective function

which is kept slightly at the same level while decreasing maximum capacity allocation.

	$DR_{o,e,p,t}$ ~N(300;50)		
$PQ^{max}_{o,e,p,t}$	-10%	-20%	-30%
Solving status	Solved	Solved	Infeasible

Table 9 : Resolution status

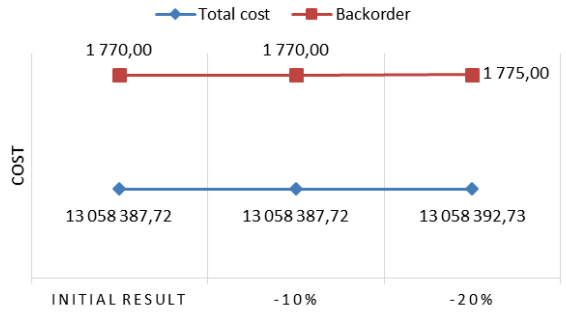


Figure 5: Maximum capacity cost impact

Likewise, a combined variability of the input parameters related to raw material inventory management is implemented. It is triggered by the resulted main level of the objective function presented previously. The considered parameters are the initial inventory level at each site, the minimum order quantity represented by the minimum supplier capacity as well as the contracted maximum capacity. The parameters' sensitivity is measured in terms of their simultaneous impact on the optimality solution, the related parameter stability region would represent the suitable upper and lower bounds to be considered for the model. It is worth noting that there is dependency between parameters, for example, customer demand impacts directly the adopted maximum and minimum capacities. Thus, as stated by (Yi Chaojue & Lu Ming, 2019), the sensitivity analysis is outlined with how a set of parameters called probe class can vary while another one known as control class is kept unchanged. In this case, the probe class includes the chosen parameters (i.e. initial inventory level, minimum order quantity & maximum capacity), while the control class is defined by the forecasted demand $DF_{o,e,p,t}$ and the maximum production capacity for each site $PQ^{max}_{o,e,p,t}$. From managerial standpoint, improving the bounds quality illustrates the related capacity threshold definition with raw material suppliers which is a considerable asset. Thus, 3 scenarios have been launched while improving the discussed bounds as $QF^{min}_{f,e,c}$ and $QF^{max}_{f,e,c}$ in addition to the initial level $ICS0_{e,c}$ as presented in table 10. As shown in figure 6, the objective function curve has been decreased to -16% for the second scenario, it is mainly related to the corresponding decrease behavior of raw material inventory (i.e. raw material purchased value and the inventory holding cost).

The implementation of real world constraints coming from mass customization context into the quantitative modeling contributes to construct a deep understanding of the supply chain contracts across partners. While including the dynamic behavior of the bill of materials coming from the customized products and the CODP positioning close to customers, the related capacity allocation for different partners can be well defined considering the input demand level and the optimization leverage of the MILP formulation. Therefore, the resulted interrelation with maximum and minimum capacities to ensure can be well clarified. This status improves the win-win coordination for the overall actors with a close understanding of markets' requirements. In addition, the numerical results highlight the global formulation as a system which can be adopted by managers to take planning decisions emanate from an appropriate framework, for instance, the inclusion of the continuous raw material assessment for an optimal stock planning considering modular product structure to accommodate replenishment trigger and the overall review policy.

	$DR_{o,e,p,t}$ ~N(300;50)		
	Scenario 1	**Scenario 2**	**Scenario 3**
Decrease (%)	-10%	-20%	-30%
$QF^{min}_{f,e,c}$	*	*	*
$QF^{max}_{f,e,c}$	*	*	*
$ICS0_{e,c}$	*	*	*
Solving status	Solved	Solved	Infeasible

Table 10: Parameters change and solving status

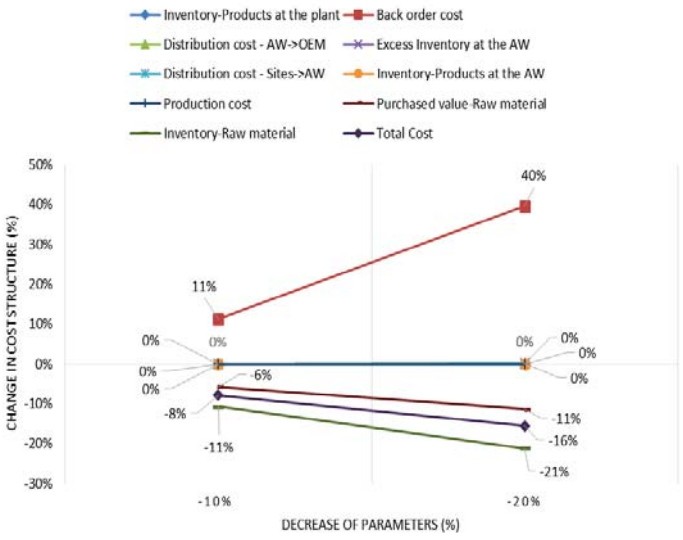


Figure 6: Objective function cost split

5 CONCLUSION

The increasing importance of supply chain management has been recognized during time from practitioners and academics. Though, dealings with mass customization strategy according to value chain management perspective has not been sufficiently reported. In this paper, the supply chain fundamental framework has been drawn asserting mass customization enablers. The study devel-

oped a MILP model for a multi-echelon, multi-site supply chain in order to catch up on the assumptions details of the problem depicted from an industrial application to outline stakeholders' interactions and the related aspects. Accordingly, the model formulation is defined through a tactical decision level while integrating production, procurement and distribution systems. In fact, a three echelon supply chain has been illustrated from the automotive industry according to leaders and followers partnership. Furthermore, the demand driven process inferred from customization products highlights the corresponding decoupling point while production activities are established with make to order policies. Thus, to develop further the presented work towards application potential, testing the model with bigger sizes from real industrial cases is an interesting attempt to assess its resolution status according to exact methods. While approaching the extreme boundaries, a benchmark between metaheuristics would support to define the best performing algorithm according to solution quality and the related computational time.

REFERENCES

Ballou, R. H. (2007). Business logistics/supply chain management: planning, organizing, and controlling the supply chain. *Pearson Education India.*

Blecker, T. et Abdelkafi, N. (2006). Mass Customization: State-of-the-Art and Challenges. Dans T. Blecker et G. Friedrich (dir.), *Mass Customization: Challenges and Solutions* (p. 1-25). Springer US.

Borgonovo, E. et Plischke, E. (2016). Sensitivity analysis: A review of recent advances. *European Journal of Operational Research*, *248*(3).

Budiman, S. D. et Rau, H. (2019). A mixed-integer model for the implementation of postponement strategies in the globalized green supply chain network. *Computers and Industrial Engineering*, *137*.

Candelo, E. (2019). Mass Customization: Another Marketing Breakthrough. Dans E. Candelo (dir.), *Marketing Innovations in the Automotive Industry : Meeting the Challenges of the Digital Age* (p. 95-103). Springer International Publishing.

Coletti, P. et Aichner, T. (2011). Mass Customization. Dans P. Coletti et T. Aichner (dir.), *Mass Customization: An Exploration of European Characteristics* (p. 23-40). Springer.

Davis, S. M. (1990). Future Perfect. Dans P. Evans, Y. Doz et A. Laurent (dir.), *Human Resource Management in International Firms: Change, Globalization, Innovation* (p. 18-28). Palgrave Macmillan UK.

Hernandez-Ruiz, K. E., Olivares-Benitez, E., Martinez-Flores, J. L. et Caballero-Morales, S. O. (2016). Optimizing Safety Stock Levels in Modular Production Systems Using Component Commonality and Group Technology Philosophy: A Study Based on Simulation. *Mathematical Problems in Engineering*, *2016*.

Jin, M., Wang, H., Zhang, Q. et Zeng, Y. (2019). Supply chain optimization based on chain management and mass customization. *Information Systems and E-Business Management*.

Liu, G. (Jason) et Deitz, G. D. (2011). Linking supply chain management with mass customization capability. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *41*(7).

Masoud, S. A. et Mason, S. J. (2016). Integrated cost optimization in a two-stage, automotive supply chain. *Computers & Operations Research*, *67*, 1-11.

Mikkola, J. H. et Skjøtt-Larsen, T. (2004). Supply-chain integration: implications for mass customization, modularization and postponement strategies. *Production Planning & Control*, *15*(4), 352-361.

Pasandideh, S. H. R., Niaki, S. T. A. et Asadi, K. (2015). Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NRGA. *Information Sciences*, *292*, 57-74.

Pine, B. J. et Pine, J. (1993). *Mass Customization: The New Frontier in Business Competition*. Harvard Business School Press.

Rafiei, H., Safaei, F. et Rabbani, M. (2018). Integrated production-distribution planning problem in a competition-based four-echelon supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, *119*, 85-99.

Selladurai, R. S. (2004). Mass customization in operations management: oxymoron or reality? *Omega*, *32*(4), 295-300.

Touil, A., Echchatbi, A. et Charkaoui, A. (2019). Integrated production and distribution in a milk supply chain under uncertainty with the Hurwicz criterion. *International Journal of Supply and Operations Management*, *6*(1), 30-50.

Tu, Q., Vonderembse, M. A., Ragu-Nathan, T. S. et Ragu-Nathan, B. (2004). Measuring Modularity-Based Manufacturing Practices and Their Impact on Mass Customization Capability: A Cus-

tomer-Driven Perspective. *Decision Sciences*, *35*(2), 147-168.

Um, J., Lyons, A., Lam, H. K. S., Cheng, T. C. E. et Dominguez-Pery, C. (2017). Product variety management and supply chain performance: A capability perspective on their relationships and competitiveness implications. *International Journal of Production Economics*, *187*, 15-26.

Xu, Y., Landon, Y., Segonds, S. et Zhang, Y. (2017). A decision support model in mass customization. *Computers & Industrial Engineering*, *114*, 11-21.

Yang, B. et Burns, N. (2003). Implications of postponement for the supply chain. *International Journal of Production Research*, 41(9), 2075-2090.

Yi Chaojue et Lu Ming. (2019). Mixed-Integer Linear Programming–Based Sensitivity Analysis in Optimization of Temporary Haul Road Layout Design for Earthmoving Operations. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *33*(3), 04019021. 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000838

TIME-INDEXED FORMULATIONS FOR THE ORDER ACCEPTANCE SCHEDULING PROBLEM UNDER ENERGY ASPECTS

Mariam BOUZID, Oussama MASMOUDI and Alice YALAOUI

ICD, LOSI, Université de Technologie de Troyes,
12 Rue Marie Curie CS 42060, 10004, Troyes
{mariam.bouzid, oussama.masmoudi, alice.yalaoui}@utt.fr

ABSTRACT: *To comply with the new challenges of sustainability, the industrial sector is revising its means of supply and production. This entails, for instance, optimizing energy consumption and costs at the operational level. In this vein, this research presents an Order Acceptance Scheduling problem (OAS) on a single machine under electricity time-of-use tariffs and taxed carbon emission periods. The objective is to maximize the total profit. This problem arises when a company decides to select and process a subset of orders only if it is possible within a predetermined time-window. Therefore, the number of possible schedules grow at a factorial rate. To tackle this NP-hard problem, two time-indexed formulations are provided. Finally, to assess the performance of the proposed models, a comparative analysis against a classical formulation is conducted.*

KEYWORDS: *Energy, Order Acceptance Scheduling, Time-indexed formulation.*

1 INTRODUCTION

For centuries, industry has been a vector for social and economic prosperity, shimmering an indefinite growth. Although, new concerns about environmental issues, such as resource depletion and greenhouse gases (GHG) emission, cast doubt upon this vision. According to the International Energy Agency, the industrial sector accounted for more than a third of the energy used in the world in 2017, which is responsible for climate changes and jeopardizing social advances at the same time.

Industry 4.0 – through the development of smart decision tools and the modernizing of equipment – allows a rational and an accountable response to the sustainability stakes, which aim at maintaining environmental, social and economic viability. At the strategic level, this is embodied by Corporate Social Responsibility (CSR) that advocate for ethics and green sustainability from global reference frameworks. At the operational level, this includes optimizing energy consumption, costs and carbon footprint. To perform efficient demand management, energy suppliers developed preferential rate, designated as time-of-use (TOU) tariffs, at specific times of the day. In the meantime, industrials must abide by the rules on regulation of GHG emissions, which are reflected by the implementation of carbon emission taxes by governments. We can mention that the objectives for reducing GHG emissions were reinforced at COP22 in Marrakesh, Morocco.

In this context, we present two time-indexed models for the OAS problem with electricity TOU tariffs and taxed carbon emission periods. This research follows up the work of (Chen et al., 2019) which presented a disjunctive model.

The paper is organised as follows. Section 2 includes a review on OAS problems and scheduling under electricity TOU tariffs. Section 3 states the problem and presents the solution approach. Section 4 features the resolution method. Section 5 presents the computational results. The last section concludes the paper and draws perspectives.

2 STATE OF THE ART

The standard OAS problem is a double-decision problem that consists in the selection and the sequencing of a subset of orders – among n – with the objective to maximize the total profit. (Slotnick, 2011) proposes a literature review on this topic, indicating that OAS are studied for both single and multi-machines systems and with various job characteristics such as preemption, release date or setup. These problems are generally known to be NP-hard as demonstrated in (Palakiti et al., 2019). At worst the number of possible schedules is $\sum_{k=1}^{n} k!$, while in standard scheduling problems, all the orders are accepted and thus only $n!$ sequences – which are all the possible permutations of n elements without repetition – can be obtained. (Oğuz et al., 2010) address the OAS problem with release dates, setup times and time-related penalties using a disjunctive Mixed Integer Linear Program (MILP). For the same problem, (Cesaret et al., 2012) propose a Tabu Search and (Silva et al., 2018) provide an efficient arc-time-indexed model. However, in the literature, time-indexed formulations are not as developed for OAS problem.

Energy considerations are essential for both economic and environmental reasons. With energy prices increase, demanding specification and taxes, the operational level takes a crucial part in the efforts for sustainability. Pricing policies, especially TOU rate, are largely studied for single and more complex systems. For instance, (Aghelinejad et al., 2018) exploit machine states mechanism to minimize total energy costs – comprising idle, transition and processing energy – on a single machine with a predetermined sequence. The latter use an on/off time-indexed model. (Che et al., 2016) formulate a time-indexed MILP and designed a greedy heuristic for the single machine under TOU electricity tariffs in order to minimize total energy costs. The same authors in (Che et al., 2017) investigate the unrelated parallel machine under TOU tariffs with energy costs minimization. (Ho et al., 2020) jointly enhance energy costs and makespan for a two-machine flow shop under TOU tariffs. Finally, for a job-shop system with TOU tariffs and peak-power considerations, (Masmoudi et al., 2019) employ a time-indexed formulation for the problem of minimizing energy costs. In the literature, energy aspects are also integrated as constraints. In (Liao et al., 2017), weighted completion time and weighted tardiness are minimized on a single machine with a periodic threshold on energy consumption. (Fang et al., 2013) minimize the makespan of a flow shop under peak power consumption constraints.
GHG emission management is another major challenge at the operational level. (Foumani and Smith-Miles, 2019) provide a comprehensive study on the different carbon taxes policies applied to a flow shop. (Zhang et al., 2014) develop a time-indexed formulation for a flow shop under TOU tariffs and carbon emission periods with a trade-off between the low-carbon emission period and the TOU on-peak hours. In their work, peak demands are handled by natural gas and base energy is provided by coal-based sources, which emit more GHG.

Few studies have been done for the OAS under TOU tariffs, and even fewer have been focused on GHG emissions. The work of (Chen et al., 2019) is the first of its kind, while proposing a benchmark and an exact solving approach with a disjunctive formulation. On this basis and upon their study, Section 3 provides two time-indexed MILP for the OAS problem with release dates under energy aspects. In Section 4 and 5, a comparative analysis based on the number of feasible and optimal solutions found and the time spent to solve instances is carried out. In addition, the characteristics of the models in terms of number of constraints and variables are discussed.

3 PROBLEM FORMULATION AND SOLUTION APPROACH

We investigate an OAS problem on a single non-preemptive machine with release dates. Each order j is characterized by its processing time p_j, release date r_j, due date d_j, deadline $\bar{d}_j$, revenue e_j, tardiness penalty w_j and power consumption Ω_j.

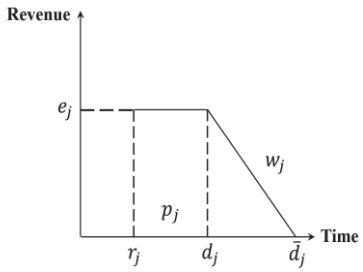


Figure 1: Profit calculation of an order j taken from (Chen et al., 2019)

Figure 1 presents the profit calculation of an order j according to its deadline, due date and tardiness penalties. An order j is accepted only if it can be finished before its deadline $\bar{d}_j$; besides , it earns the totality of its revenue e_j until its due date d_j, since the tardiness penalties w_j are applied after d_j.

In the initial work of (Chen et al., 2019), the horizon is divided into m and h intervals of electricity TOU and carbon emission respectively. Each electricity TOU interval $k = 1, \dots, m$ is characterized by an electricity cost EC_k and a starting time b_k and each carbon emission interval $l = 1, \dots, h$ is defined by its starting time g_l and an amount q_l of emitted carbon per kg, applying a Tax for each emitted kg of CO_2. For the sake of simplicity, in our formulations the time horizon is split into T periods determined in equation (1), where each period is characterized by its electricity TOU cost and the amount of emitted CO_2.

$$T = \max_{j=1,\dots,n} \bar{d}_j + 1 \quad (1)$$

In this problem, idle times are considered but their energy consumption is neglected. The objective is to maximize the sum of the profit of the orders minus the environmental costs during processing time.

Two time-indexed MILP models are developed for this profit and time-driven problem. These formulations rely on the discretization of time, *i.e.* time is divided into unitary slots $t = 0, \dots, T$.

The energy cost c_{jt} is precomputed for each order $j = 1, \dots, n$ and at each time processing time $t = r_j, \dots, \bar{d}_j$:

$$c_{jt} = \frac{\Omega_j}{60}\left(\sum_{k=1}^{m} EC_k \mathbb{I}_{\substack{t \geq b_{k-1} \\ t < b_k}} + Tax \sum_{l=1}^{h} q_l \mathbb{I}_{\substack{t \geq g_{l-1} \\ t < g_l}}\right) \quad (2)$$

In equation (2), $\mathbb{I}_x$ denotes the indicator function, which takes value 1 if condition x holds and 0 otherwise. For each order j at each time t, the power consumption – expressed into minutes – is multiplied by the cost of the respective TOU interval $k = 1, \dots, m$ of period $t \in [b_{k-1}, b_k[$ and the taxed CO_2 emission interval $l = 1, \dots, h$ of period $t \in [g_{l-1}, g_l[$.

3.1 Pulse formulation

The first time-indexed model is known as the pulse formulation, where the binary decision variables $x_{jt} = 1$ indicates that order $j = 1, \dots, n$ starts at time $t = 1, .., T$ or not ($x_{jt} = 0$). Note that the possible periods for the starting time of an order j are $t = r_j, \dots, \bar{d}_j - p_j + 1$.

The profit f_{jt} of an order $j = 1, \dots, n$ at time $t = r_j + p_j, \dots, \bar{d}_j$ is precomputed. Equation (3) corresponds to this calculation, which is the revenue minus the possible tardiness penalties when $t > d_j$.

$$f_{jt} = e_j - w_j \max\{0; t - d_j\} \quad (3)$$

The corresponding MILP is written as follows.

$$\text{maximize} \sum_{j=1}^{n} \sum_{t=r_j}^{\bar{d}_j - p_j + 1} x_{jt} \left(f_{jt} - \left(\sum_{t'=t}^{t+p_j-1} c_{jt'} \right) \right) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jt} \leq 1, \forall t = 0, \dots, T \quad (5)$$

$$\sum_{t=r_j}^{\bar{d}_j - p_j + 1} x_{jt} \leq 1, \forall j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{t=0}^{r_j - 1} x_{jt} = 0, \forall j = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{t=(\bar{d}_j - p_j + 1)+1}^{T} x_{jt} = 0, \forall j = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$x_{it} + \sum_{\substack{t'=t \\ r_j + 1 \leq t' \leq \bar{d}_j}}^{t+p_i-1} x_{jt'} \leq 1, \forall i, j = 1, \dots, n; i \neq j, \forall t = r_i, \dots, \bar{d}_i - p_i + 1 \quad (9)$$

The objective (4) is the maximization of the sum of the total profit of each order, that is the profit f_{jt} including the tardiness penalties and environmental cost during the processing time, given by the sum of $c_{jt'}$ from the starting time t until completion $t + p_j - 1$. Constraints (5) specify that at each time t, the machine can start only one job. Constraints (6) restrict the starting time of each order to the interval defined from its release date to its deadline. In the same manner, constraints (7) and (8) prevent each order to be processed before its release date and after its deadline. Constraints (9) prevent any order j to overlap in the interval $[t, t + p_i - 1]$ when an order i starts at time $t = r_i, \dots, \bar{d}_i - p_i + 1$.

Table 1 presents the optimal solution of an example with $n = 4$ orders with their processing times $p = [5,3,2,4]$, release dates $r = [1,2,1,1]$, due dates $d = [6,5,12,7]$, deadlines $\bar{d} = [9,10,14,12]$, revenues $e = [10,10,6,10]$, power consumption $\Omega = [1,2,1,1]$ and weight penalties $w = [2,1,3,2]$. Finally, the starting times of TOU and carbon emission intervals $b = g = [0,5,8]$, the electricity price $EC = [2,10,2]$ and the amount of CO_2 emitted $q = [4,1,4]$ are defined.

j \ t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 1: Optimal solution represented by the values of the decision variables x, sequence is 4-2-3 and order 1 is rejected.

For this example, there are 180 constraints and 80 variables. The optimal solution has been found in 0.01 s.

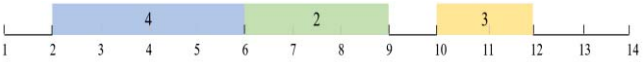


Figure 2: Gantt chart representation for the example.

3.2 On-off formulation

The second model presented is the on-off formulation. Each binary decision variable $x_{jt} = 1$ indicates whether the order j is processed at time $t = r_j, \dots, \bar{d}_j$, or not $x_{jt} = 0$. In addition, the binary decision variable $a_j = 1$ represents whether the order j is accepted.

$$\text{maximize} \sum_{j=1}^{n} \left(a_j e_j - w_j \max_{t=d_j, \dots \bar{d}_j} \{t - d_j\} x_{jt} - \sum_{t=r_j}^{\bar{d}_j} c_{jt} x_{jt} \right) \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jt} \leq 1, \forall t = 0, \dots, T \quad (11)$$

$$\sum_{t=0}^{r_j - 1} x_{jt} = 0, \forall j = 1, \dots, n \quad (12)$$

$$\sum_{t=\bar{d}_j + 1}^{T} x_{jt} = 0, \forall j = 1, \dots, n \quad (13)$$

$$p_j a_j = \sum_{t=r_j}^{\bar{d}_j} x_{jt}, \forall j = 1, \dots, n \quad (14)$$

$$\sum_{t'=r_j}^{t-p_j} x_{jt'} + \sum_{t'=t+p_j}^{\bar{d}_j} x_{jt'} \leq (1 - x_{jt}) p_j, \forall j = 1, \dots, n, \forall t = r_j, \dots, \bar{d}_j \quad (15)$$

The objective function (10) is the maximization of the total profit of the accepted orders, i.e. their revenues $a_j e_j$ minus their possible tardiness penalties w_j by retrieving the instant $t = d_j, \dots, \bar{d}_j$ when $x_{jt} = 1$ (completion time) and the environmental costs during processing time. Constraints (11) state that at each time the machine is either doing nothing or processing an order. Constraints (12) and (13) ensure that each order cannot be processed before its release date and after its deadline. Constraints (14) impose that each accepted order must be processed during the totality of its processing time. Constraints (15) guarantee non-preemption by forcing the continuity of the decision variables.

Table 2 presents the same solution as in 3.1 with the perspective of the on-off model.

j \ t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
4	0	0	1	1	1	1	0	0		0	0	0	0	0	0

Table 2: Optimal solution represented by the values of the decision variables x, sequence is 4-2-3.

For this solution and this formulation, there are 97 constraints and 111 variables. The optimal solution has been found in 0.03s.

4 RESOLUTION METHOD

The considered benchmark derives from the work of (Chen et al., 2019). Similar TOU tariffs and carbon emission periods are used. Instances with various number of orders $n = 5,\ 10,\ 15,\ 20,\ 50$ and with different characteristics are tested in order to have a diverse set of instances. Two coefficients are used to generate the parameters of an instance: the tardiness factor $\tau = 0.1, 0.3, 0.5$ and the due date ranges $R = 0.1, 0.5, 0.9$. This first comparative study involves 45 instances.

Processing time, release date and revenue are generated with an uniform distribution: $p_j, e_j \sim \mathcal{U}(1,20)$ and $r_j \sim \mathcal{U}(0, \tau p_T)$ with $p_T = \sum_{j=1}^{n} p_j$. Due dates, deadlines, tardiness penalties and power consumption are computed from the values of these generated parameters:

$$d_j = r_j + \max\{slack, p_j\} \tag{16}$$

$$slack \sim \mathcal{U}\left(p_T\left(1 - \tau - \frac{R}{2}\right), p_T\left(1 - \tau + \frac{R}{2}\right)\right) \tag{17}$$

$$\bar{d_j} = d_j + Rp_j \tag{18}$$

$$w_j = \frac{e_j}{\bar{d_j} - d_j} \tag{19}$$

$$\Omega_j \sim \mathcal{U}(1, e_j) \times \frac{1}{2} \tag{20}$$

This ensures coherent values for these parameters. For instance, the deadline must be greater or equal to the due date.

The tested models are the pulse formulation, the on/off formulation and the disjunctive model of (Chen et al., 2019). For the sake of comparability, each model has been implemented and solved in a commercial solver (IBM CPLEX Optimization Studio v12.9) on a desktop computer with processor Intel i5 2GHz CPU with 4GB RAM. Solving time is limited to 3600 seconds.

5 COMPUTATIONAL RESULTS

Table 3 resumes the benchmark results for each model and their average performances for 9 instances of same size and different values for τ and R. Average solving time ($\overline{cpu}$), average gap ($\overline{gap}$) and the number of feasible ($\#fea$) and optimal ($\#opt$) solutions found are reported. In our tests, the gap is retrieved from CPLEX relative MILP gap, which represent the gap between the best bound and the best integral solution found by the solver. A summary of the performances of all formulation on the 45 instances is also provided.

The results clearly point out that time-indexed formulations outperform a standard disjunctive model on average. The pulse formulation find 38 optimal solutions among 44 in 711 seconds on average, which represent a success rate of 86%. In contrast, the disjunctive formulation takes on average more than twice the time to find half of the optimal solutions. The on/off formulation provides similar results to the pulse model, achieving a rate of 84% of optimal solutions found in 721 seconds on average. This model seems to be more performant than the pulse formulation for small to medium instances ($n = 5, 10, 15, 20$), finding all the optimal solutions in less time. However, its average gap is less tight than the pulse formulation.

The size of time-indexed formulations (constraints and variables) is their main weakness. Indeed, both time-indexed formulations cannot find all the feasible solutions of the benchmark due to either out-of-memory issues or low quality gap. At worst, the on-off formulation has $\mathcal{O}(nT) + \mathcal{O}(n)$ variables and $\mathcal{O}(nT)$ constraints, whereas the pulse formulation has $\mathcal{O}(nT)$ variables and $\mathcal{O}(n^2T)$ constraints. The disjunctive formulation has $\mathcal{O}(n^2) + \mathcal{O}(nm) + \mathcal{O}(nh)$ variables and constraints.

As seen in Section 3, the pulse formulation binary variables contain information for both acceptance and the instant where the order starts, whereas the on/off formulation differs in semantic. A binary variable x_{jt} in the pulse formulation corresponds to $p_j + 1$ variables in the on/off formulation. The pulse formulation effectiveness on average compared to the on/off model may reside in the use of less binary variables and thus imply a lower number of branching. Nevertheless, the number of constraints in the on/off model provides an advantage for small instances.

6 CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In this paper, we presented two time-indexed formulations for the OAS with release dates under energy aspects.
Our proposed formulations are more performant on average than the disjunctive formulation described in (Chen et al., 2019). This can be explained by their LP-relaxation which provide good bound for medium instances, according to (van den Akker et al., 2000). Moreover, time-indexed models seem to be the most efficient formulations

for this problem since the objective is the maximization of a time-driven profit comprising time-related penalties and time-varying environmental costs. However, these formulations are limited by their spatial complexity. Our future work is focused on the development of dedicated cuts or other exact approaches that have the potential to improve the performances for large instances. Finally, time-indexed formulations for an extension of the proposed problem with setup-dependent sequence are under development.

	Disjunctive model				**Time-indexed pulse**				**Time-indexed on/off**			
n	#fea	#opt	$\overline{cpu}$	$\overline{gap}$	#fea	#opt	$\overline{cpu}$	$\overline{gap}$	#fea	#opt	$\overline{cpu}$	$\overline{gap}$
5	9	9	0.07	0.0	9	9	0.05	0.0	9	9	0.07	0.0
10	9	9	47.7	0.0	9	9	8.4	0.0	9	9	0.94	0.0
15	9	3	2416	4.2	9	8	471	0.08	9	9	23	0.0
20	9	3	2404	2.8	9	8	574	0.02	9	9	146	0.0
50	9	0	3600	5.9	8*	4	2503	0.1	8*	1	3434	6
summary	45	24	1693	2.5	44	38	711	0.05	44	37	721	1.2

Table 3: Models performances in terms of solving time, gap to the best-bound, feasible and optimal solutions (*out-of-memory status or found infinite gap).

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the Grand-Est region and the Aube department in France.

REFERENCES

Aghelinejad, M., Ouazene, Y., Yalaoui, A., 2018. Production scheduling optimisation with machine state and time-dependent energy costs. International Journal of Production Research 56, 5558–5575.

Cesaret, B., Oğuz, C., Sibel Salman, F., 2012. A tabu search algorithm for order acceptance and scheduling. Computers & Operations Research 39, 1197–1205. https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.09.018

Che, A., Zeng, Y., Lyu, K., 2016. An efficient greedy insertion heuristic for energy-conscious single machine scheduling problem under time-of-use electricity tariffs. Journal of Cleaner Production 129, 565–577. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.150

Che, A., Zhang, S., Wu, X., 2017. Energy-conscious unrelated parallel machine scheduling under time-of-use electricity tariffs. Journal of Cleaner Production 156, 688–697. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.018

Chen, S.-H., Liou, Y.-C., Chen, Y.-H., Wang, K.-C., 2019. Order acceptance and scheduling problem with carbon emission reduction and electricity

Chen, S.-H., Liou, Y.-C., Chen, Y.-H., Wang, K.-C., 2019. Order acceptance and scheduling problem with carbon emission reduction and electricity tariffs on a single machine. Sustainability (Switzerland) 11. https://doi.org/10.3390/su11195432

Fang, K., Uhan, N.A., Zhao, F., Sutherland, J.W., 2013. Flow shop scheduling with peak power consumption constraints. Ann Oper Res 206, 115–145. https://doi.org/10.1007/s10479-012-1294-z

Foumani, M., Smith-Miles, K., 2019b. The impact of various carbon reduction policies on green flowshop scheduling. Applied Energy 249, 300–315.

Ho, M.H., Hnaien, F., Dugardin, F., 2020. Electricity cost minimisation for optimal makespan solution in flow shop scheduling under time-of-use tariffs. International Journal of Production Research. https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1715504

Liao, X., Zhang, R., Chiong, R., 2017. Multi-objective optimization of single machine scheduling with energy consumption constraints, in: 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Presented at the 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence

(SSCI), IEEE, Honolulu, HI, pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285403

Masmoudi, O., Delorme, X., Gianessi, P., 2019. Job-shop scheduling problem with energy consideration. International Journal of Production Economics 216, 12–22. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.021

Og, C., Salman, F.S., Yalçın, Z.B., others, 2010. Order acceptance and scheduling decisions in make-to-order systems. International Journal of Production Economics 125, 200–211.

Palakiti, V.P., Mohan, U., Ganesan, V.K., 2019. Order acceptance and scheduling: overview and complexity results. International Journal of Operational Research 34, 369–386.

Silva, Y.L.T.V., Subramanian, A., Pessoa, A.A., 2018. Exact and heuristic algorithms for order acceptance and scheduling with sequence-dependent setup times. Computers and Operations Research 90, 142–160. https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.09.006

Slotnick, S.A., 2011. Order acceptance and scheduling: A taxonomy and review. European Journal of Operational Research 212, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.09.042

van den Akker, J.M., Hurkens, C.A.J., Savelsbergh, M.W.P., 2000. Time-Indexed Formulations for Machine Scheduling Problems: Column Generation. INFORMS Journal on Computing 12, 111–124. https://doi.org/10.1287/ijoc.12.2.111.11896

Zhang, H., Zhao, F., Fang, K., Sutherland, J.W., 2014. Energy-conscious flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs. CIRP Annals 63, 37–40. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.011

A new bi-objective optimization model for bus priority network design

Jin Chen, Peng Wu

School of Economics & Management
Fuzhou University, China
jinchenfzu@gmail.com, wupeng88857@gmail.com

Feng Chu

Laboratory IBISC, Univ Evry,
Université de Paris-Saclay, France
feng.chu@univ-evry.fr

Chengbin Chu

ESIEE Paris, Université Gustave Effeil,
Noisy-le-Grand, France
chengbin.chu@gmail.com

ABSTRACT : *A widely adopted measure to alleviate urban traffic congestion is to give priority to public transport systems. Bus priority lanes enable buses to move quickly with less disruption, improve transmission reliability, and provide better scheduling-related performance. This article proposes a new bi-objective optimization model for bus priority network design. The objectives are to maximize the total benefits which are calculated by the total saving time by deploying bus priority lanes and the connectivity defined by a balanced connection between the selected terminal nodes subject to a given budget, simultaneously. At first, a novel bi-objective integer linear programming model is developed for resolving the problem. Then, an iterative ε-constraint method is proposed to obtain the Pareto frontier. Finally, a fuzzy-logic-based approach is used to suggest a preferred Pareto-optimal solution for decision makers. The results of a case study demonstrate that the proposed approach is able to produce a satisfactory and balanced bus priority network.*

KEYWORDS : *Transportation planning, bus priority lane, bi-objective optimization, iterative method.*

1 INTRODUCTION

With the rapid development of economies, the daily travel needs of people are increasing rapidly. Due to the rapid and continuous growth of car ownership, traffic congestion has become more and more serious. Traffic congestion and its associated problems, such as air and noise pollution, energy consumption and traffic accidents, have become major issues in many cities around the world. Much worldwide practical experience has proved that developing public transport systems is highly expected to solve the above problems.

However, due to the nature of low speed and uncontrollable time of buses, the bus service becomes less and less attractive. Therefore, it is necessary to design efficient and reliable public transport networks. Because road resources are limited, it is difficult to expand existing road sections. To achieve the above goal, deploying bus priority lanes to fully use existing road sections becomes an effective and wise alternative.

In recent years, numerous bus-priority studies have been proposed. Ceder (2004) describes the lessons learned from six case studies in Athens, Dublin, Munich, Turin, Vienna, and Zurich, and the benefits derived from the implementation of public transit priorities in these cities. Mesbah *et al.* (2008, 2010, 2011a, 2011b) first introduce a system-wide approach for designing priority lanes, and they propose a bi-level model combining priority lanes selection and traffic assignment.

In order to improve the efficiency of bus operation, more and more cities have begun to deploy bus priority lanes, but most of bus priority lanes in these cities are scattered and lack a systematic planning. Thus, traffic jams often occur at the origin and destination of a bus priority lane. In this case, it is usually interrupted when a bus arrives at the intersection, affecting the overall operation. Therefore, it is necessary to deploy a connected bus priority network instead of reserving isolated bus lanes. However, as far as we know, limited study has deliberated optimal bus priority network design.

Hadas *et al.* (2014) propose an optimization model for selecting bus lanes for constructing a connected bus priority network, which aims to maximize the total saving time while maintaining balanced origin and destination terminals subject to a given budget. The proposed model in Ceder *et al.* (2014) involves two stages in which the first stage is to enumerate a set of possible paths between any pair of terminal nodes and the second one is to formulate an integer program that is solved by solver CPLEX. We note that the existing model cannot guarantee that the obtained solution is an optimal solution, since the enumeration stage may miss optimal paths for an optimal solution. Moreover, the work (Ceder *et al.* 2014) essentially considers a single-objective optimization problem.

Different from Ceder *et al.* (2014), this paper develops a new single-stage bi-objective bus priority network optimization model, which always ensure that an optimal solution is obtained after it is exactly solved. For the bi-objective model, an iterative and fuzzy-logic approach based on ε-constraint is proposed to obtain Pareto frontier and provide a preferred Pareto-optimal solution for decision makers.

The remainder of this paper is organized as follows. Sec-

tion II describes the considered problem, and proposes an optimal model for connected urban bus priority network. Section III introduces the concept of multi-objective optimization and an iterative and fuzzy-logic approach based on ε-constraint which is proposed to solve the proposed program. A case study based on an Israel mid-size city (Ceder *et al.* 2014) is conducted to verify the performance of the proposed model in Section IV. Section V concludes this paper.

2 PROBLEM DESCRIPTION AND FORMULATION

In this section, we first describe the studied problem formally. Then, a new single-stage bi-objective bus priority lane network optimization model is developed.

2.1 PROBLEM DESCRIPTION

Graph $G(N, A)$ is called an urban bus transportation network, where N is the set of nodes and A is the set of directed arcs. Give a set of tasks and terminal pairs, and each task corresponds to one terminal pair.

The purpose of the considered problem is to design a connected urban bus network of priority lanes. However, deploying priority lanes on existing road sections will lead to increasing traffic pressure in other lanes. Hence, maximizing the total benefits which are calculated by the total saving time by deploying bus priority lanes is one objective of the problem. The other objective is to maximize the network connectivity defined by a balanced connection between origin and destination nodes.

To better define and formulate the problem, we make the following assumptions : i) there is at least one path between any pair of terminal nodes ; and ii) at most one lane in a road section is considered as a bus priority lane, regardless of adding one lane as a bus priority lane on an existing road section.

2.2 FORMULATION

Here we introduce the indices, parameters, and decision variables which throughout the article.

2.2.1 INDICES

i, j : index of nodes
k : index of terminal pairs

2.2.2 PARAMERTERS

N : set of nodes
A : set of arcs, $(i, j) \in A$
K : set of terminal pairs, $k \in K$
I : set of terminal nodes
B : the given budget of the construction of priority lanes
c_{ij} : construction cost of road section (i, j)
f_{ij} : total passengers' flow of all routes passing through road section (i, j)
τ_{ij} : travel time of buses on a priority lane on road section (i, j)
τ'_{ij} : travel time of buses on road section (i, j) when no lanes are reserved
v_{ij} : bus travel time saved by deploying a priority lane on road section (i, j), $v_{ij} = \tau'_{ij} - \tau_{ij}$
o_k : origin station of a terminal pair $k \in K$
d_k : destination station of a terminal pair $k \in K$

2.2.3 DECISION VARIABLES

z_{ij} : a binary variable equals to 1 if a priority lane is set on road section (i, j) ; 0 otherwise, where $(i, j) \in A$.
x^k_{ij} : a binary variable equals to 1 if a priority lane is set on road section (i, j), and a path of a terminal pair k passes through it ; 0 otherwise, where $(i, j) \in A$, $k \in K$.
y_k : a binary variable equals to 1 if terminal pair k is selected, priority lanes are deployed on road sections which a path of a terminal pair k passes through, $y_k = 1$; 0 otherwise, where $k \in K$.

2.3 FORMULATION

$$P: \quad F_1 = \max \sum_{(i,j)\in A} z_{ij} v_{ij} f_{ij} \tag{1}$$

$$F_2 = \max \min_{i \in I} \min\Big(\sum_{k \in K | o_k = i} y_k, \sum_{k \in K | d_k = i} y_k \Big) \tag{2}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{(i,j)\in A} z_{ij} c_{ij} \le B \tag{3}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} x^k_{ij} = y_k, i = o_k, \forall k \in K \tag{4}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} x^k_{ij} = y_k, j = d_k, \forall k \in K \tag{5}$$

$$x^k_{ij} \le y_k, \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \tag{6}$$

$$x^k_{ij} \le z_{ij}, \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \tag{7}$$

$$\sum_{k \in K} x^k_{ij} \ge z_{ij}, \forall (i,j) \in A \tag{8}$$

$$x^k_{ij}, y_k, z_{ij} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \tag{9}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} x^k_{ij} = \sum_{(j,i)\in A} x^k_{ji}, \quad \forall j \in N \backslash \{o_k, d_k\}, \forall k \in K \tag{10}$$

Objective (1) maximizes the total benefits of deploying priority lanes. The total benefits are computed by the total saving time brought by bus priority lanes. Objective (2) is to balance the selected terminal nodes. This balance is maintained in this way that maximizing the minimal

in-degrees and outdegrees of all terminal nodes among all feasible solutions. If a priority lanes set is unbalanced, it will produce an effect on the total reliability of the public traffic network and reduce the level of service. Constraint (3) restricts that the entire construction cost of the deploying bus priority network can not exceed the given budget B. Constraint (4) describes that if a terminal pair k is selected, priority lanes will be deployed on all road sections ending at origin station of a terminal pair $k \in K$. The same to constraint (4), constraint (5) describes that if a terminal pair k is selected, priority lanes will be deployed on all road sections ending at destination station of a terminal pair $k \in K$. Constraint (6) means that for a terminal pair k, if a priority lane on road section (i, j) is passed (i.e., $x_{ij}^k = 1$), then this pair of terminal nodes are considered to set a priority path (i.e.,$y_k = 1$). Constraint (7) implies that if a path of a terminal pair k passes through road section (i, j), then a priority lane should be reserved in this road section (i, j). Constraint (8) indicates that a road section (i, j) is set as a priority lane and must have at least a path of a terminal pair k passes through it. Constraint (9) implies x_{ij}^k, y_k and z_{ij} are binary decision variables. Constraint (10) is a flow balance constraint. It makes sure flow balance of the intermediate nodes between the origin and destination of each task.

It is not easy to directly deal with objective (2), hence we reformulate objective (2) by the following equivalent way. First, we define a new non-negative decision variable R. Then, objective (2) can be reformulated as :

$$F_2 = \max \quad R \tag{11}$$

$$R \leq \sum_{k \in K | o_k = i} y_k, \forall i \in I \tag{12}$$

$$R \leq \sum_{k \in K | d_k = i} y_k, \forall i \in I \tag{13}$$

Constraints (12) and (13) enforce the in-degree and out-degree bounds.

3 SOLUTION METHODS

In this section, the basic principle of multi-objective optimization is presented at first. Then, we propose an iterative and fuzzy-logic approach based on ε-constraint to solve the proposed bi-objective model.

3.1 THE BASIC PRINCIPLE OF MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION

On the whole, a multi-objective optimization problem is composed of multiple objective functions and some related equations and inequality constraints. It can be generally described as follows.

$$\begin{aligned} & \min \quad F(X) = [f_1(x), f_2(x), ..., f_m(x)]^T \\ \text{s.t.} \quad & g_i(x) \leq 0, \qquad i = 1, 2, ..., I \\ & h_j(x) = 0, \qquad j = 1, 2, .., J \end{aligned}$$

where m indicates the number of objectives. The number of inequality constraints and equality constraints are denoted by I, J, respectively.

For the sake of analysis, we make the following equivalent substitution :

$$F_1' = -F_1$$
$$F_2' = -F_2$$

Then we reformulate the bi-objective model P as follows :

$$\min \quad F(\phi) = \{F_1'(\phi), F_2'(\phi)\} \quad \text{s.t.} \quad \phi \in \Phi$$

where ϕ and Φ are the solution vector formed by all decision variables and the solution space defined by (3)-(9) and (12)-(13). $F_1'(\phi)$ and $F_2'(\phi)$ imply the total benefits by deploying priority lanes and balanced connection between the selected terminal nodes, respectively. $\{F_1'(\phi), F_2'(\phi) | \phi \in \Phi\}$ defines the objective space. Then we give the definitions related to bi-objective optimization.

DEFINITION 1 A non-dominated (Pareto-optimal) solution $\phi^* \in \Phi$ satisfies that no solution $\phi \in \Phi$ exists make $F_1'(\phi) \leq F_1'(\phi^*)$ and $F_2'(\phi) \leq F_2'(\phi^*)$, where at least one of these inequalities is strict.

DEFINITION 2 If $\phi^* \in \Phi$ is a non-dominated solution, $(F_1'(\phi^*), F_2'(\phi^*))$ is called a non-dominated (Pareto) point in objective space. The Pareto frontier is composed of all non-dominated points.

In the existing literature, there are two main methods for obtaining the Pareto frontier : the weighted-sum method and the ε-constraint method. Since the ε-constraint method avoids the difficulty caused by scaling objective functions and setting objective weights. Hence in this paper we adapt the ε-constraint-based method to solve the proposed problem next.

3.2 AN ITERATIVE AND FUZZY-LOGIC APPROACH BASED ON ε-CONSTRAINT

In this section, we propose an iterative and fuzzy-logic approach based on ε-constraint to solve the above program. This method is composed of two steps. At first, the initial bi-objective problem P is transferred into a single-objective problem by ε-constraint method. The ε-constraint method is to reserve the main objective while setting the other objective as an ε-constraint. Then, resolving a series of ε-constraint problems through updating ε's value in an

appropriate way to obtain Pareto frontier. The second step is to select a preferred Pareto-optimal solution by employing a fuzzy-logic-based approach.

We first need to determine which objective is main objective. As the matter of fact, both objectives can be considered since the Pareto frontiers are the same no matter what the main function is. But the computational complexity of two versions are quite different. Based on our consideration, we choose F_1 as the main objective function. Then P is transformed into the single-objective ε-constraint problem $P(\varepsilon_j)$ as follows.

$$F_1' = \min - \sum_{(i,j)\in A} z_{ij} v_{ij} f_{ij} \tag{14}$$

s.t. (3)-(9), (12), (13)

$$F_2' = -R \leq \varepsilon_j \tag{15}$$

where $\varepsilon_j = F_2'(j-1) - \Delta$ in the j-th iteration, in winch $F_2'(j-1)$ is opposite number of decision variable R of the $(j-1)$-th iteration and Δ indicates the step length.

Identifying the value of ε is the key component of solving model $P(\varepsilon_j)$, and it further depends on the interval of ε. In order to determine this interval, we take the following four single-objective models to obtain the Ideal point and the Nadir point.

$$\begin{aligned}
&F_1'^I = \min \quad F_1' \\
&\quad \text{s.t. (3)-(9), (12), (13)} \\
&F_2'^I = \min \quad F_2' \\
&\quad \text{s.t. (3)-(9), (12), (13)} \\
&F_1'^N = \min \quad F_1' \\
&\quad \text{s.t. } F_2' = F_2'^I, \text{(3)-(9), (12), (13)} \\
&F_2'^N = \min \quad F_2' \\
&\quad \text{s.t. } F_1' = F_1'^I, \text{(3)-(9), (12), (13)}
\end{aligned}$$

Therefore, the obtained Ideal and Nadir points are $\left(F_1'^I, F_2'^I\right)$ and $\left(F_1'^N, F_2'^N\right)$, respectively. And the interval of ε is determined by $\left[F_2'^I, F_2'^N\right]$. For the first iteration, ε_0 is set as $F_2'^N$. For the $(j-1)$ iteration $(j>1)$, ε_j is defined by

$$\varepsilon_j = F_2'\left(\varepsilon_{j-1}\right) - \Delta \tag{16}$$

where $F_2'(\varepsilon_{j-1})$ denotes $R(\varepsilon_{j-1})$ being the solution obtained by solving $P(\varepsilon_{j-1})$, and Δ is the step length which is set as the minimum unit value of F_2' (Wu *et al.* 2015). For the studied problem, the minimum unit is set as 1. The Pareto frontier of the studied bi-objective model can be derived from solving all $P(\varepsilon_j)$ with a step length which indicates 1. Note that Δ is set as 0 in the first iteration.

Finally, a preferred Pareto-optimal solution can be selected for decision makers by the fuzzy-logic-based method which is proposed by Esmaili *et al.* (2009) among the Pareto points obtained above. The fuzzy-logic-based method can recommend the optimal solution according to the preference of the decision makers. For the studied problem, linear membership functions $\delta\{F_1(j)\}$ represents the optimality degree of the total benefits of the j-th Pareto point in the Pareto frontier F are defined as follows :

$$\delta\{F_1(j)\} = \begin{cases} 1, & if F_1(j) \leq {F_1}^I \\ \dfrac{{F_1}^N - F_1(j)}{{F_1}^N - {F_1}^I}, & if {F_1}^I < F_1(j) < {F_1}^N, j \in F \\ 0, & if F_1(j) \geq {F_1}^N \end{cases} \tag{17}$$

where $F_1(j)$ denote the objective value of F_1 the j-th Pareto point. Both ${F_1}^N$ and ${F_1}^I$ are the upper and lower bounds of F_1', respectively.

The membership functions $\delta\{F_1(j)\}$ can be similarly defined. The definition of the total membership degree δ_j which indicates the optimality degree of the j-th Pareto solution is as follows :

$$\delta_j = \frac{w_1 \delta(F_1) + w_2 \delta(F_2)}{w_1 + w_2} \tag{18}$$

where w_1 and w_2 are the weights for the total passenger travel time and the balance function, respectively, and $\sum_{i=1}^{2} w_i$ in this model. Without loss of generality, decision makers select the Pareto point of maximum membership as the Pareto optimal solution.

4 CASE STUDY

We evaluate the performance of the proposed method in this section by testing the benchmark example in Petah-Tiqwa, Israel (Ceder *et al.* 2014). The test is done on a PC with Intel Core i5 CPU, 2.2 GHz, and 8GB RAM. The bi-objective program is exactly solved by using C++ embedded with commercial solver CPLEX 12.8 in Visual Studio 2019.

In Israel, Petah-Tiqwa is the fifth largest city which is located in Israel's largest metropolitan area (Gush-Dan). Urban public traffic network which presented in figure 1 is provided by one bus company for this city. Private and commercial vehicles share the same road resources. Each arc is a segment that can be used as part of a possible priority lane. All circled nodes are a set of possible origins and destinations for bus lanes. This instance has 44 arcs and 34 nodes, including 15 terminals. Transport tasks may occur between any two terminals. The OD pairs are known in advance.

Since the related data is not availiable in Ceder *et. al* (2014), we randomly generate the data according to the information provided in Ceder *et. al* (2014). After solving the bi-objective model, we can obtain 6 different non-dominated points. To visually and clearly show the trade-off between the objectives, figure 2 draws the Pareto frontier of

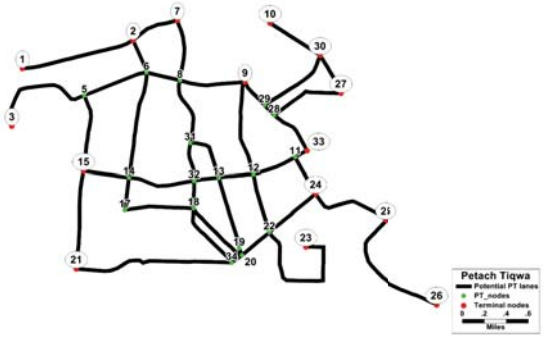


FIGURE 1 – Urban public traffic network in Petah-Tiqwa

the benchmark instance with setting B = 60,000,000. Figure 3 illustrates the obtained optimal bus priority network.

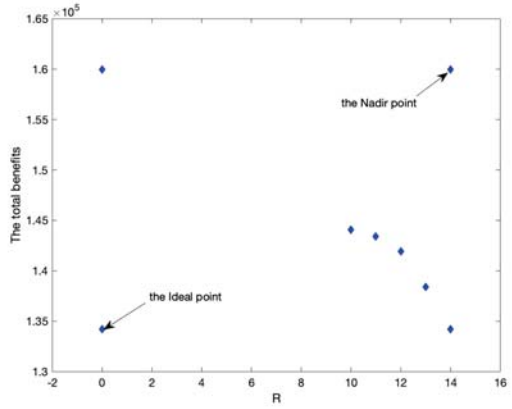


FIGURE 2 – The Pareto frontier of the case study

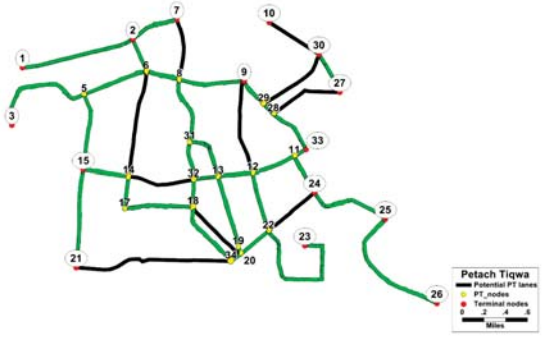


FIGURE 3 – Selected network of priority lanes

Table 1 present all Pareto points for the benchmark instance with setting B = 60,000,000. For the sake of recommending the most preferred solution for decision makers, we assume that three different preference combinations on the objectives (i.e., $w_1 > w_2$, $w_1 = w_2$, and $w_1 < w_2$). If $w_1 = 0.9$ implying $w_2 = 0.1$, which indicates that decision makers expect to provide a high service level for passengers. Consequently, the Pareto point $(134190, 14)$ is advised. On the contrary, if $w_1 = 0.1$ implying $w_2 = 0.9$, then the Pareto point $(159945, 0)$ is recommended, with which the F_1 is greatly increased but a much smaller F_2 is obtained. In addition, if decision makers exhibit equal preference, i.e., $w_1 = w_2 = 0.5$, then the Pareto point $(134190, 14)$ and $(159945, 0)$ are selected, with which neither too high F_1 nor too big F_2 is achieved.

5 CONCLUSION

This study proposes a novel model for a bus priority network design problem. The model aims to maximize the total benefits by deploying bus priority lanes, at the same time, maintain the balance by maximizing the minimal in-degrees and out-degrees of all terminal nodes among all feasible solutions. To solve the proposed bi-objective model, an iterative and fuzzy-logic approach based on ε-constraint is proposed. Computational results of a case study confirms the effectiveness and correctness of the proposed model.

In the future, our research directions will include but not be limited to : i) the effect on carbon emission reduction caused by bus priority networks should be considered. With the improvement of bus service level, more and more passengers will travel by bus instead of private cars, thus reducing carbon emissions. ii) due to the NP-hard characteristic of the problem, the proposed model is solved by solver CPLEX, and the solution time will increase with the growth of the problem size. Therefore, we focus on developing efficient algorithms (Montemanni *et al.* 2005, Che *et al.* 2015, Ghosh *et al.* 2019, Wu *et al.* 2019, Mishra *et al.* 2018), to solve large-scale problems in acceptable time.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported in part by the National Natural Science Foundation of China under Grants 71701049, 71871059 in part by the Natural Science Foundation of Fujian Province, China under Grant 2018J05120, and in part by the Major Project Funding for Social Science Research Base in Fujian Province Social Science Planning under Grant FJ2018JDZ024.

REFERENCES

A. Che, P. Wu, F. Chu, and M. Zhou, (2015), Improved quantum-inspired evolutionary algorithm for large-size lane reservation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems*, vol. 45, no. 12, pp. 1535–1548.

Ceder A., (2004), New urban public transportation systems : Initiatives, effectiveness, and challenges. *Journal of Urban Planning Development*, vol. 130, no. 1, pp. 56–65.

Demir E., Bektaş T, and Laporte G., (2014), The bi-objective pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 232, no. 3, pp.464–478.

j	F_1	F_2	$\delta\{F_1(j)\}$	$\delta\{F_2(j)\}$	$\delta_j(w_1 = 0.9)$	$\delta_j(w_1 = 0.5)$	$\delta_j(w_1 = 0.1)$
1	159945	0	0	1.000	0.100	0.500	**0.900**
2	144063	10	0.617	0.286	0.584	0.451	0.319
3	143437	11	0.641	0.214	0.598	0.428	0.257
4	141950	12	0.699	0.143	0.643	0.421	0.198
5	138385	13	0.837	0.017	0.761	0.454	0.148
6	134190	14	1.000	0.000	**0.900**	0.500	0.100

Tableau 1 – Computational results for the case study

Esmaili M., Shayanfar HA., and Amjady N., (2009), Multi-objective congestion management incorporating voltage and transient stabilities. *Energy*, vol. 34, no. 9, pp. 1401–1412.

Ghosh S., Zhu J., and Liu S., (2019), Model and algorithm of routes planning for emergency relief distribution in disaster management with disaster information update. *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 38, no. 1, pp. 208–223.

Hadas Y., Ceder A., (2014), Optimal connected urban bus network of priority lanes. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, pp. 49–57.

J. He, F. Chu, *et al.*, (2019), A multi-objective distribution-free model and method for stochastic disassembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, no. 4, pp. 1–17.

Mesbah M., Sarvi M. and Currie G., (2008), New methodology for optimizing transit priority at the network level. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, pp. 93–100.

Mesbah M., Sarvi M. and Currie G., (2010), Policy-making tool for optimization of transit priority lanes in urban network. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, pp. 54–62.

Mesbah M., Sarvi M. and Currie G., (2011a), Optimization of transit priority in the transportation network using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 908–919.

Mesbah M., Sarvi M. and Currie G., (2011b), Optimization of transit priority in the transportation network using a decomposition methodology. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, pp. 363–373.

Mishra G., Mazumdar S., and Pal A., (2018), Improved algorithms for the evacuation route planning problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 36, no. 1, pp. 280–306.

Montemanni R., L. M. Gambardella, *et al.* (2005), Ant colony system for a dynamic vehicle routing problem. *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 10, no. 4, pp. 327–343.

P. Wu, A. Che, F. Chu and M. Zhou, (2015), An improved exact ε-constraint and cut-and-solve combined method for biobjective robust lane reservation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 3, pp.1479-1492.

P. Wu, J. Cheng, C. Feng (2019), Resource-constrained emergency scheduling for forest fires with priority areas : An efficient integer-programming approach. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 261–270.

Pratt R. and Evans J., (2004), *TCRP REPORT 95 Traveler Response to Transportation System Changes Handbook, Third Edition : Chapter 10, Bus Routing and Coverage*.

PRISE EN COMPTE DE LA SANTE-SECURITE DANS LA CONCEPTION ET L'EXPLOITATION DES SYSTEMES RECONFIGURABLES

Juan Camilo GOMEZ ECHEVERRI[1]
juancamilo.gomezecheverri@ensam.eu
Xavier GODOT [1]
xavier.godot@ensam.eu
Bruno DAILLE-LEFEVRE [2]
bruno.daille-lefevre@inrs.fr

Jorge Humberto MORALES ARISTIZABAL
jorge.ma96@hotmail.com
Patrick MARTIN [1, *]
Patrick.martin@ensam.eu

1 Laboratoire de Conception Fabrication Commande - Arts et Métiers, Université de Lorraine, 4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz, France
2 Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Département Ingénierie des Equipements de Travail, 1 rue du Morvan, 54519 Vandœuvre-Lès-Nancy cedex, France
**Auteur correspondant*

RESUME :
Des sauts technologiques significatifs sont induits par la mise en œuvre de l'usine du futur, les interactions entre l'Homme et les équipements de production sont modifiées afin de répondre aux objectifs de réactivité, de contrôlabilité, d'évolution de l'environnement de travail. Ceci conduit pour la santé-sécurité au travail à de nouveaux enjeux tout au long du cycle de conception et d'exploitation du système. Afin d'apporter des éléments de réponse à ces enjeux, cet article présente les concepts, méthodes, outils proposés et validés sur un cas d'étude de système de production reconfigurable avec des opérations humaines et robotisées, dans un objectif de prévention intégrée. Au niveau du poste de travail, l'accident est directement associé à la présence simultanée de l'opérateur et de l'objet dangereux. L'identification de situations dangereuses et donc la prévention nécessite d'investiguer l'ordonnancement des tâches, l'identification de paramètres caractéristiques de conception (flux d'énergie, volume d'influence) associés aux risques potentiels. L'exploitation des données qualitative et quantitatives permet d'aider le concepteur dans ses activités de conception sûre des situations de travail. Le traitement de des informations (hétérogènes et en interaction) permet de proposer et de valider des configurations spatiales et temporelles.

MOTS-CLES : *industrie 4.0, facteurs humains, conception / innovation, systèmes de production de biens et de service, santé-sécurité, systèmes reconfigurables.*

1 INTRODUCTION - PROBLEMATIQUE

De nombreuses études soulignent l'importance dans le paradigme de l'usine du futur, de la prise en compte et de l'intégration de l'Homme dans les systèmes de production (CEE 2012, EFFRA 2019, FIM 2015, FURURPROD 2013, Veltz et Weil 2015). L'usine du futur présente plusieurs angles d'analyse: systèmes de production connectés et adaptatifs, virtualisation, procédés de fabrication avancés, robots et machines automatisés, aspects humains et sociaux. Nous nous intéressons particulièrement aux aspects santé et sécurité au travail liés à la mise en œuvre de nouveaux équipements et à l'organisation de la production. Ceci s'appuie à la fois sur l'analyse des usages et la modélisation des situations de travail pour leur conception et leur exploitation.
Au sein de l'usine du futur les risques fondamentaux pour la santé–sécurité sont ceux identifiés au niveau de la normalisation (AFNOR 2010) par contre leurs occurrences, leurs causes, leurs gravités, dépendent directement du nouveau contexte et des nouvelles conditions et situations de travail en particulier en terme :

- De conception des équipements pour la reconfigurabilité,
- D'interactions Homme-robot et Homme - Homme (transport, assemblage, qualification produit, mise au point… .) en cours de production,
- D'utilisation au cours des phases de production, de préparation, de maintenance, de reconfiguration,
- D'organisation de la production ou du poste de travail (pilotage de la production, flux tiré, flux poussé, lean-manufacturing, auto-organisation, marges de manœuvre).

Ce nouveau contexte conduit à un certain nombre d'interrogations à la fois sur les éléments à prendre en compte au niveau des technologies mises en œuvre, des spécifications de l'usage de l'équipement de travail, du pilotage des équipements et de la production. Les modélisations réalisées permettent ainsi de développer des simulations pour la validation de l'utilisation sûre de l'équipement de travail.
La prise en compte de l'humain dans l'interaction avec un robot (Murashov et al.), une ligne d'assemblage (Kruger et al.) ou un système de production (Shahrokhi et Bernard, Thomas project) ont fait l'objet de différents travaux. Cependant ils ne répondent que partiellement à une approche

méthodologique complète associant à la fois les concepts, les éléments significatifs de qualification et de quantification, de réponse aux exigences antagonistes de santé–sécurité et de performance industrielle. En particulier elle se positionne dans le cadre de la « prévention intégrée » qui consiste à appliquer au plus tôt des principes de conception sûre à un futur équipement de travail (De Galvez et al, 2017). La méthodologie proposée dans cet article répond à des objectifs de généricité, de dynamisme et d'intégration, et est centrée sur l'identification systématique des phénomènes dangereux et de leur gravité par l'utilisation des objets intermédiaires caractéristiques pour la modélisation du poste de travail. Elle a été validée sur un exemple de système de production reconfigurable. Les principaux questionnements associés à notre problématique portent sur :

- Comment spécifier, puis concevoir des îlots de production sécurisés qui présentent des périmètres fonctionnels et d'usages évolutifs pour différentes situations de vie (montage, réglage, exploitation, modification, démantèlement...) ?
- Comment protéger les opérateurs dans un environnement en évolution constante (plates-formes autonomes, robots collaboratifs, etc.) ?
- Comment gérer en sécurité les phases de reconfiguration ?
- Quelle est l'impact des robots collaboratifs, des nouvelles interfaces Homme-machine, etc… sur l'activité des opérateurs de production ou de maintenance et sur leurs encadrants ?
- Comment assurer la conduite de la production dans un environnement variable et perturbé: différence entre prescrit et réel, phases transitoires ?
- Comment assurer la réponse simultanée aux objectifs de performances (productivité, flexibilité, qualité) et de santé- sécurité ?

2 SYSTEMES ET MACHINES RECONFIGURABLES

Les systèmes et machines reconfigurables ont été étudiés depuis de nombreuses années selon des points de vue technologiques (Koren et al., 1999), (D'Acunto et Martin 2009), organisationnels ou logistiques (Benyoucef 2019). Cette reconfiguration peut être prise en compte au niveau de la machine (modules, outillages…) (fig 1.) ou ilot (machines, routage…) que ce soit au niveau physique, contrôle - commande (automates, réseau de communication) ou pilotage (centralisé, coordonné, auto – organisé). Afin d'assurer la productivité et la réactivité, la reconfiguration peut être réalisée au niveau des machines, de l'organisation des postes de travail, des flux de produits, du partage des tâches entre l'Homme et le robot. Les machines possèdent des redondances fonctionnelles et la gamme de fabrication n'est pas connue a priori.

Aussi la gamme est établie juste avant le lancement de la production ou pendant la production. La modélisation de configurations d'ilots de production, de l'organisation spatiale des éléments caractéristiques, des opérations à réaliser et de leur planification, doit permettre de réaliser des scenarii d'exploitation et d'identifier ainsi les risques potentiels en matière de santé-sécurité au niveau de la conception comme de l'exploitation.

Pour ce faire nous avons défini un exemple type de système de production reconfigurable comportant (fig. 2) comportant à la fois des opérations d'usinage sur machine reconfigurable, de contrôle, d'assemblage, de préparation, de stockage. La production prévue est celle de deux produits A et B composés comme suit :

- pour le produit A de 2 pièces usinées P1i et P2i puis assemblées,
- pour le produit B pièce P3i usinée puis assemblée avec P4i (prise en stock).

Dans un premier temps seul le produit A est réalisé avec la pièce P1i usinée sur M1 (fraiseuse à broche verticale) et la pièce P2i sur M2 (fraiseuse à broche verticale). Dans un second temps l'ilot fabrique A et B, dans ce cas P1i et P2i sont réalisés sur M1 et P3i sur M2 reconfigurée en fraiseuse à broche horizontale.

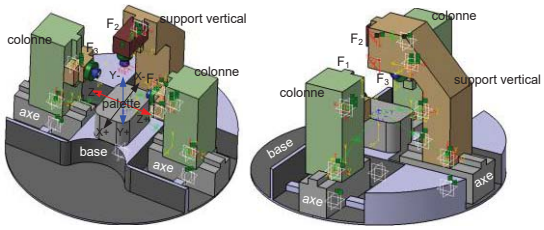


Figure 1: Machine-outil reconfigurable

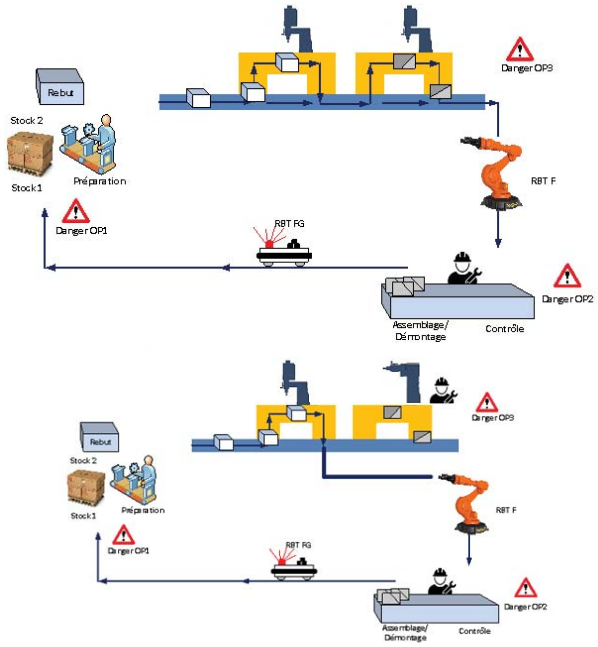


Figure 2: Les deux configurations de l'ilot de fabrication support de l'étude

3 IDENTIFICATION DE SITUATIONS DANGEREUSES

L'accident est directement associé à la présence simultanée de l'opérateur et de l'objet dangereux au niveau du poste de travail. L'identification de situations dangereuses et donc la prévention nécessite donc d'investiguer:
- l'ordonnancement des tâches;
- l'identification des paramètres de conception caractéristiques liés à la qualification des risques ;
- la quantification des risques et leur exploitation afin d'aider le concepteur dans ses activités de conception sûre des situations de travail.

3.1 Planification

Nous illustrons cet aspect sur notre exemple de système reconfigurable. Le planning des phases d'une production répétitive de produits A et B (fig. 3) met en évidence les séquences potentiellement dangereuses associant les robots (robot à base fixe 6 axes, robot mobile filoguidé) et les opérateurs OP1 (préparation) et OP2 (contrôle et assemblage), le robot 6 axes et l'opérateur OP3 (reconfiguration). Le séquencement des opérations dans le même espace de travail, entre l'opérateur et le robot permet de montrer la prise en compte de la sécurité dans la planification des tâches (principe de séparation dans le temps). Ainsi la planification en temps réel des tâches réalisées par l'opérateur et l'élément dangereux constitue une première réponse à la réduction des risques.

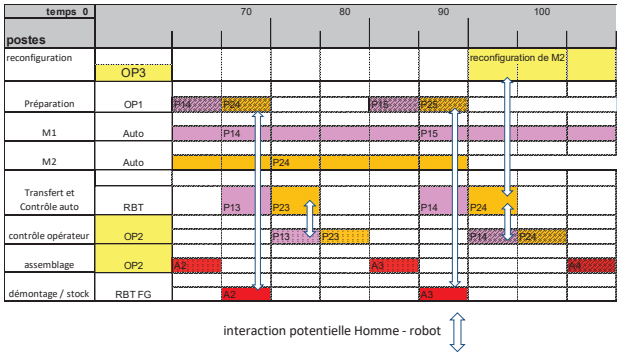


Figure 3 : Planning des opérations montrant des périodes communes ou décalées entre l'opérateur et le robot d'utilisation de l'espace de travail.

4 PARAMETRES SIGNIFICATIFS POUR LA DESCRIPTION DU POSTE DE TRAVAIL

4.1 Définition des éléments constituants

Afin d'identifier les phénomènes dangereux au plus tôt durant le processus de conception, l'axe choisi a été d'utiliser les paramètres pertinents de conception générés par le concepteur au cours de cette phase.

La figure 4 présente les différents éléments fonctionnels constituants un système de production permettant de définir la composition de l'ilot de production (composé de postes de travail et eux-mêmes de modules fonctionnels et des opérateurs. A chaque module pourront être associés les paramètres significatifs (énergie et volume d'influence) liés aux risques potentiels. Dans ces définitions, l'opérateur est au même niveau que des modules fonctionnels et peut réaliser la plupart de ces opérations.

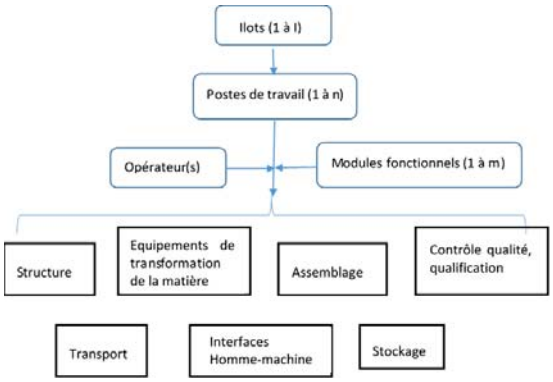


Figure 4 : Typologie des éléments constituants les ilots de production

Chaque module possède des éléments mécaniques, physiques, électroniques ou logiciels assurant des actions physiques, de contrôle / qualification et de décision. L'opérateur possède également les mêmes fonctionnalités. L'interaction, à un instant donné entre les modules et l'opérateur (s), engendre des actions qui peuvent conduire à des phénomènes dangereux. Les risques sont étudiés à deux niveaux : machine (interaction entre modules et opérateurs) et ilot (interaction entre postes de travail et opérateurs). La granulométrie est choisie par le concepteur compte tenu de son objectif (lien organisation, gestion de l'espace, usage, ...), de sa connaissance de l'état de l'ilot de production, de la précision d'analyse recherchée. Elle joue ainsi un rôle déterminant afin de permettre le suivi des phénomènes dangereux et de leur niveau de gravité selon les modifications faites au système de production.
La figure 5 illustre les liens entre ces paramètres de conception et ceux utilisés pour l'analyse des risques ainsi que les différentes étapes permettant de réduire les risques au niveau de la conception comme de l'exploitation.

4.2 Identification des énergies mise en oeuvre

L'hypothèse forte de l'approche est que les phénomènes dangereux sont liés à la présence d'énergie. Ainsi la démarche EZID (pour Energy ana-lysis for systematic haZard Identification during Design) a été proposée par (De Galvez et al. 2017). Les paramètres de conception liés à un flux d'énergie peuvent être répartis en deux familles : les paramètres principaux énergétiques qui caractérisent un flux d'énergie (description technologique de la manière dont ce flux circule dans la machine) et les paramètres complémentaires (forme, matériau, état de surface, trajectoire). En se basant sur les variables généralisées pour plusieurs types d'énergie (Borutsky 2009), et sur

l'analyse de normes sur la prévention des accidents (AFNOR 2008, AFNOR 2010), il a été possible de proposer une table des paramètres représentatifs de l'ensemble des énergies généralisées (fig.6).

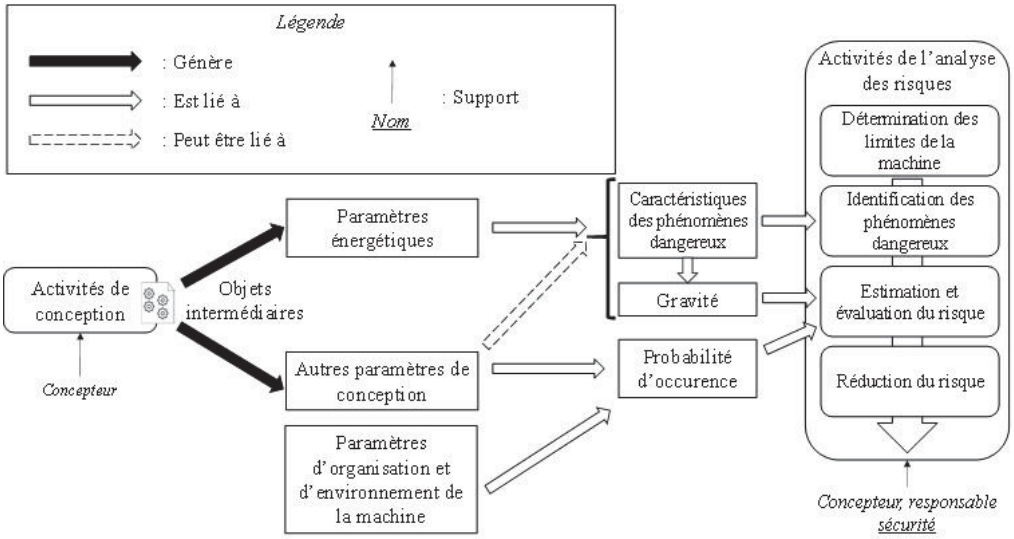


Figure 5 : Liens entre les paramètres de conception et ceux utilisés pour l'estimation-évaluation des risques (De Galvez 2016)

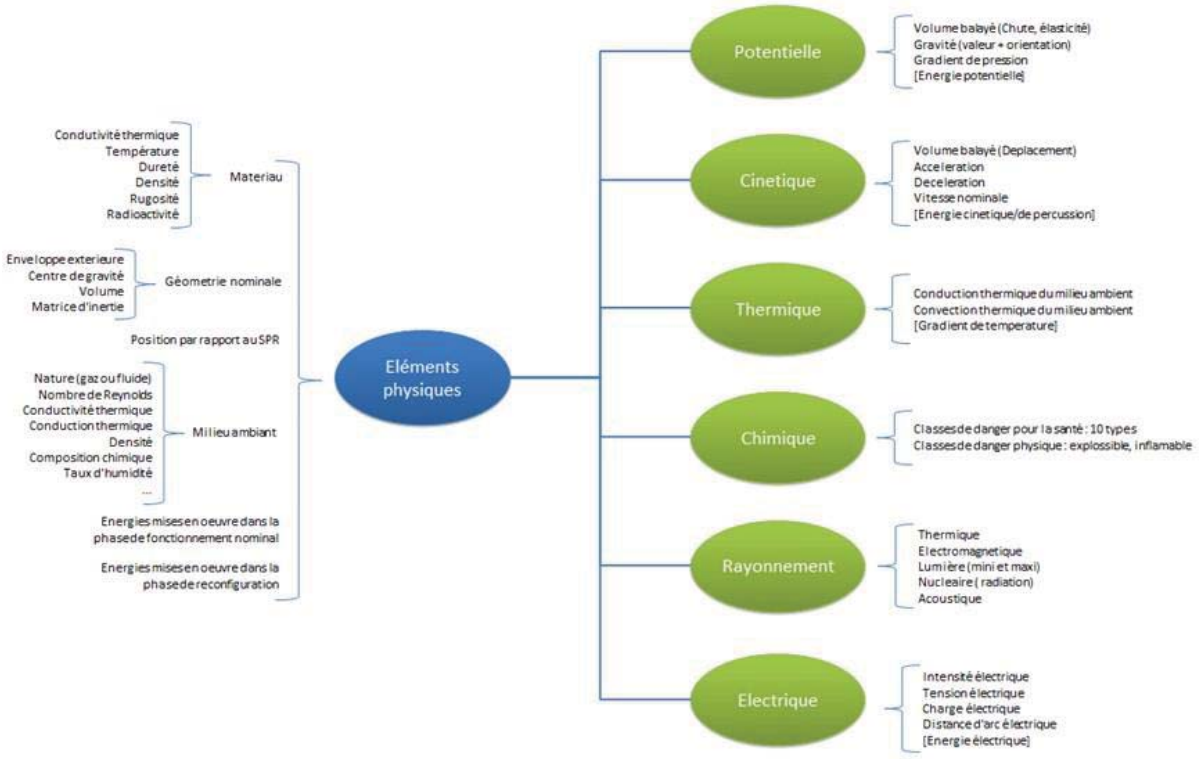


Figure 6 : Paramètres des flux énergétiques généralisés et des paramètres complémentaires (Gomez- Echeverri, 2018)

4.3 Volume d'influence

L'accident est lié à la présence de l'opérateur dans l'espace occupé à un instant donné par un élément dangereux. Cet élément dangereux peut apparaitre au niveau de la tâche réalisée (outil coupant, …) mais aussi potentiellement existant dans la machine et libéré au moment de la tâche d'une façon volontaire ou non (énergie mécanique potentielle, fluide sous pression, polluant, ...). Ainsi nous utilisons le concept de volume d'influence (VI). Il est défini comme l'espace physique où une ou plusieurs propriété(s) des modules peuvent agir. Les paramètres des volumes d'influence ont été définis pour les énergies généralisées associées aux risques de santé-sécurité (fig. 6) (Gomez Echeverri 2018). Soulignons que le VI de structure est le volume de base pour les autres types de VI, car les caractéristiques permettent de déterminer toutes les autres.
La zone dangereuse (géométrie) est définie par les espaces occupées à chaque étape étudiée (suite d'images statiques) par les zones d'influence des équipements et l'opérateur (modélisation simplifiée).
Nous prenons comme hypothèse que tous les éléments pertinents pour notre analyse peuvent être décrits par la géométrie et ainsi par des modèles CAO spécifiques afin d'illustrer et de valider la démarche. Un exemple de validation pour l'ilot de fabrication support de l'étude est présenté figure 7.

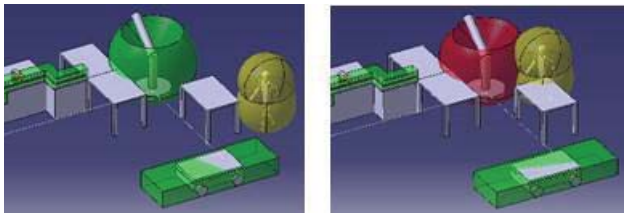


Figure 7 : Modélisation CAO des volumes d'influence

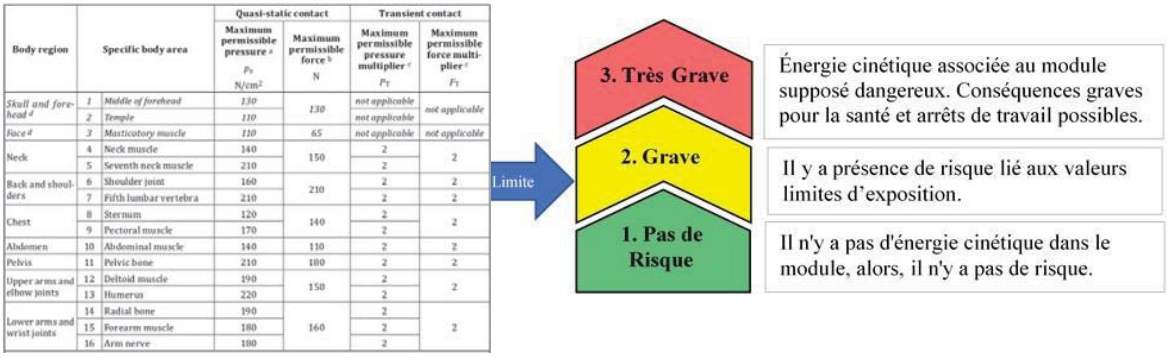
5 QUANTIFICATION DES RISQUES

La simulation géométrique sert à représenter les volumes d'influence correspondant à chaque module présent dans le système de production, il s'agit ensuite de représenter le niveau de gravité associé à chaque volume d'influence, permettant ainsi de connaître les risques potentiels et d'en déduire les mesures de prévention. L'information utile pour le concepteur pour choisir la solution technique à mettre en œuvre se limite au niveau gravité mais ne porte pas ni sur la fréquence ni sur la probabilité.
La quantification de la gravité est réalisée par l'analyse des normes associées (INRS 2017, INRS 2018 a, b, c, INRS 2019, ISO/TS 15066:2016) à chaque type d'énergie identifié. Nous avons pu constater que les informations disponibles sur chaque type de risque ne sont pas les mêmes : sous forme de tableaux à plusieurs paramètres, à trois ou quatre niveaux, associée à une partie du corps….
A partir de ces informations la valeur énergétique maximale à laquelle le travailleur est exposé, a été classée sur une échelle de niveau de gravité de 1 à 3 ou 4. Cette information permet au concepteur de choisir une solution technique ou organisationnelle de façon à éliminer les cas graves et très graves (Morales Aristizabal 2019). Les figures 8 et 9 illustre les résultats de cette analyse de gravité pour deux cas : énergie cinétique et énergie thermique.

D'autre part, le tableau 2 présente les résultats d'une simulation pour l'identification de risques potentiels et de leurs niveaux de gravité pour les cas 1 (arrêt total de la ligne lors de la reconfiguration) et pour le cas 2 (modification de la ligne avec production en parallèle) lors du scenario défini au paragraphe 3.1 (fig. 3). Les valeurs dans le tableau indiquent la gravité potentielle des tâches pour trois types de volume d'influence et pour différentes étapes du planning de production.

Temps	VI physique	VI cinétique	VI Potentielle
Cas 1			
70	1	1	2
90	1	2	2
110	1	2	2
130	0	4	3
150	1	0	1
Cas 2			
70	1	1	2
90	2	4	2
110	3	4	2
130	0	4	3
150	1	2	1

Tableau 1 (Gomez Echeverri 2018)



Body region		Specific body area	Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure [a] P_T N/cm²	Maximum permissible force [b] N	Maximum permissible pressure multiplier [c] P_T	Maximum permissible force multiplier [c] F_T
Skull and forehead [d]	*1*	*Middle of forehead*	*130*	*130*	*not applicable*	*not applicable*
	2	*Temple*	*110*		*not applicable*	
Face [d]	*3*	*Masticatory muscle*	*110*	*65*	*not applicable*	*not applicable*
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	2
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	
Abdomen	10	Abdominal muscle	140	110	2	2
Pelvis	11	Pelvic bone	210	180	2	2
Upper arms and elbow joints	12	Deltoid muscle	190	150	2	2
	13	Humerus	220		2	
Lower arms and wrist joints	14	Radial bone	190	160	2	2
	15	Forearm muscle	180		2	
	16	Arm nerve	180		2	

Figure 8 : Passage du tableau des limites biomécaniques à une échelle à trois niveaux

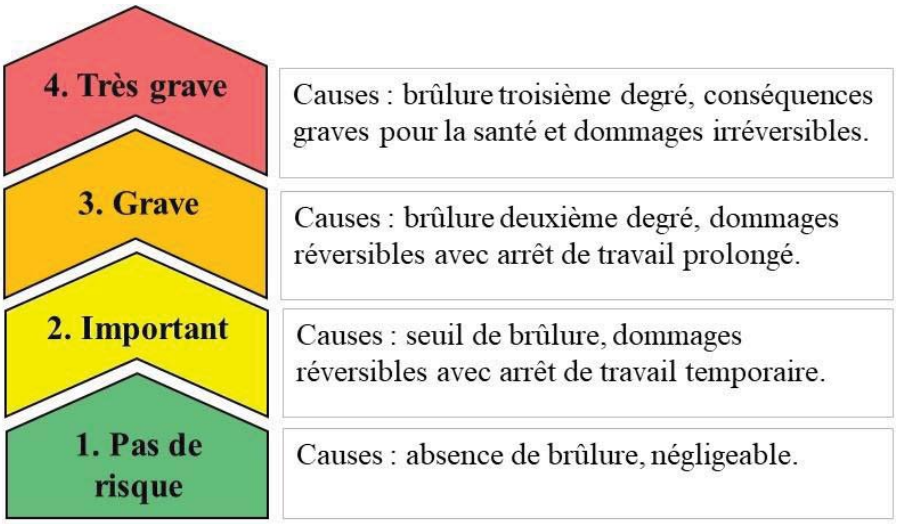


Figure 9 : Tableau des valeurs thermiques à une échelle à 4 niveaux

6 CONCLUSIONS

Des sauts technologiques significatifs sont induits par la mise en œuvre de l'usine du futur, les interactions entre l'Homme et les équipements de production sont modifiées afin de répondre aux objectifs de réactivité, de contrôlabilité, d'évolution de l'environnement de travail. Ceci conduit pour la santé-sécurité au travail à de nouveaux enjeux tout au long du cycle de conception et d'exploitation du système par la maitrise (identifier, évaluer, agir) de façon dynamique de la situation de travail (interaction système / opérateurs / organisation).

Afin de répondre à ces objectifs, nos travaux qui se positionnent dans un objectif de prévention intégrée ont porté sur l'identification de paramètres caractéristiques de situations dangereuses : flux d'énergie, volume d'influence associés aux risques potentiels définis dans les normes existantes pour l'ensemble des types d'énergie. Ces éléments sont mis en œuvre dans des outils de traitement d'informations hétérogènes et en interaction (CAO, bases de données, tableaux de liens) permettant de proposer et de valider des configurations spatiales et temporelles.

Une difficulté apparue lors de ces études a été d'adapter une échelle de gravité commune à tous les volumes d'influence, car les informations disponibles sur chaque type de risque ne sont pas les mêmes. Il serait pertinent d'utiliser une échelle de gravité plus large afin que le concepteur puisse proposer selon le niveau de gravité une solution optimale et efficace pour supprimer le risque tout en assurant une productivité et une qualité suffisante. Le niveau de dangerosité potentiel lié aux énergies généralisées présentes à un instant donné et dans un espace défini est identifié lors de la phase de conception architecturale. Ainsi le concepteur peut proposer des modifications de configuration physique ou imposer une modification de la planification des tâches permettant de passer d'un niveau de gravité élevé à un niveau sans risque dans le respect des normes. De plus il serait intéressant d'affiner les données énergétiques à l'aide d'une échelle continue.

La démarche et les outils proposés ont été validés sur un cas simple, leurs mises en œuvre sur des cas industriels

reste à entreprendre afin d'étudier le comportement dynamique du système de production et d'identifier les conditions limites d'usage.

REMERCIEMENTS

Ce projet s'inscrit dans le cadre du laboratoire LC2S (Laboratoire mixte pour la conception sûre de situations de travail) soutenu par l'INRS et le LCFC / ENSAM dont l'objectif est de fournir aux concepteurs d'équipements de travail une démarche structurée et outillée pour passer de la conception de systèmes techniques à la conception des situations de travail pour concilier performance et prévention des risques professionnels.

REFERENCES

AFNOR, 2008. NF EN 1005, *Safety of machinery - Human physical performance*

AFNOR, 2010. NF EN ISO 12100 - *Safety of machinery, General principles for design*

Benyoucef L. (Editor) 2019. *Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation*, Springer Series in Advanced Manufacturing,

Borutsky 2009. *Bond graph methodology: development and analysis of multidisciplinary dynamic system model,* Springer Science & Business Media

CEE 2012 : *Une industrie européenne plus forte au service de la croissance et de la relance économique,* Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen

D'Acunto A., Martin P., 2009. "*Methodology of Reconfigurable Machine Tool: Structural and Architectural Designing Process*"2nd IPROMS International Researchers Symposium., 22-24 July, 2009, Ischia, Italy

De Galvez, N., 2016. *Sécurité des machines : méthodologie d'identification systématique des phénomènes dangereux en conception*, thèse de doctorat ENSAM, 12 Décembre 2016.

De Galvez N, Marsot J., Martin P., Siadat A., Etienne A., 2017, A new approach to hazard identification during the design process by analysing energy transfers", *Safety Science*, Volume 95, p. 1-14

EFFRA 2019: *Effra vision for a manufacturing partnership in Horizon Europe*, www.effra.eu

FIM 2015, *Guide pratique de l'usine du futur, enjeux et panorama de solutions*, Fédération des Industries Mécaniques, www.industriedufutur.fim.net, (access 16/01/2018)

FUTURPROD, 2013 : *Les systèmes de production du futur*, Atelier de Réflexion Prospective de l'ANR, www.cluster-gospi.fr, (access 16/01/2018)

Gomez Echeverri J. C., 2018, *Prise en compte dans la conception et l'exploitation des postes de travail de l'usine du futur des aspects sante – sécurité* », mémoire de master KIMP-CII, ENSAM

INRS, 2017 *Interventions à proximité des réseaux électriques aériens. Place des détecteurs de lignes électriques dans la démarche de prévention*, ED6292.

INRS, 2018a *Dossier Bruit*.

INRS, 2018b *Dossier Champs Électromagnétiques*.

INRS, 2018c *Dossier Rayonnements Optiques*.

INRS, 2019. *Dossier Rayonnements Ionisants*.

ISO/TS 15066:2016. *Technical specification Robots et dispositifs robotiques — Robots coopératifs.*

Koren, Y., Moriwaki T. , Jovane F., Ulsoy G., Van Brussel, (1999) Reconfigurable Manufacturing Systems, *Annals of the CIRP*, 48/2, 527-540

Kruger, J., Lien, T. K., Verl, A., (2009) Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* 58, 2009, pp. 628–646.

Morales Aristizabal J. H.,2019, *Quantification des risques dans la conception des systèmes de production reconfigurables,* mémoire de master KIMP-CII, ENSAM

Murashov, V., Hearl, F., Howard, J. ,(2016), Working safely with robot workers: Recommendations for the new workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13 (3), pp. 61-71.

Shahrokhi, M., Bernard, A., (2009) A framework to develop an analysis agent for evaluating human performance in manufacturing systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology,* 2(1), pp.55-60.

Thomas project, (2014), Mobile dual arm robotic workers with embedded cognition for hybrid and dynamically reconfigurable manufacturing systems, FoF.NMP-723616, http://www.thomas-project.eu.

Veltz P., and Weil T. 2015. L'industrie, notre avenir, *La Fabrique de l'Industrie,*

VERS UN CADRE MÉTHODOLOGIQUE DE CONCEPTION DES SYSTÈMES HUMAINS-ROBOTS

M. BOUNOUAR

Arts et Métiers Institute of Technology, LCFC
4, Rue Augustin Fresnel
Metz, France
mouad.bounouar@ensam.eu

R. BÉARÉE

Arts et Métiers Institute of Technology, LISPEN
8, Bd Louis XIV
Lille – France
richard.bearee@ensam.eu

A. SIADAT

Arts et Métiers Institute of Technology, LCFC
4, Rue Augustin Fresnel
Metz, France
ali.siadat@ensam.eu

T-H. BENCHEKROUN

Crtd - CNAM, équipe ergonomie
41, Rue Gay-Lussac
Paris – France
tahar-hakim.benchekroun@lecnam.net

RESUME : *La robotique industrielle a connu des évolutions remarquables. Grâce au développement technologique et à l'évolution des dispositifs de sécurité, une nouvelle génération de robots fonctionnant sans barrières matérielles est apparue. Cette nouvelle génération de robots, dits collaboratifs, ouvre des perspectives pour des systèmes de production où humains et robots 'collaborent' pour gérer la fluctuation de la demande et les nombreuses formes de variabilités rencontrées sur un poste de travail.*

Ces nouvelles perspectives donnent lieu à des discussions et débats englobant la sécurité des futurs utilisateurs, la rentabilité de ces investissements et leurs impacts sur la productivité, la qualité, les conditions de travail des opérateurs humains et leurs activités réelles. Elles ont renforcé le besoin d'une conception qui ne se focalise pas seulement sur l'élément technologique, mais aussi sur son utilisation potentielle en prenant en compte le travail réel et les futurs utilisateurs dès les premières phases de conception. Pour contribuer à ce débat, nous proposons dans cette communication un cadre méthodologique de conduite des projets cobotiques en prenant en compte les différents enjeux (de sécurité, de faisabilité, de rentabilité, etc.) et en s'inspirant des principales disciplines intégrant le travail réel et les futurs utilisateurs dès les premières étapes du processus de conception.

MOTS-CLES : *Ergonomie de l'activité, Interaction Humains-Machines, Facteurs Humains, Management de projet, Robotique collaborative, conception centrée utilisateur.*

1 INTRODUCTION

La robotique a connu des évolutions diverses et rapides. En moins d'un demi-siècle, ce domaine a traversé différents niveaux d'évolution (Hägele et al., 2016 ; Vicentini, 2020), transformant ainsi le travail, et impactant de plus en plus la place de l'opérateur humain dans les systèmes de production. Passant d'une époque où l'intégration d'un robot signifiait une automatisation complète ; désormais, une robotisation n'implique pas forcément une suppression de l'activité humaine, car une nouvelle typologie de robots dits 'collaboratifs' est apparue. Grace à leurs mesures de sécurité intrinsèque (capteurs de couple par exemple), ces robots peuvent partager le même espace de travail, ainsi qu'un ensemble de tâches avec les opérateurs (Safeea et al., 2019 ; Sallez et al., 2020).

Ces nouvelles générations de robots s'ajoutent aux solutions robotiques conventionnelles pour constituer une large famille de solutions robotiques qui peuvent être classées en 3 sous-familles de solutions robotiques (Bounouar et al., 2019) :

- Les solutions robotiques qui reprennent les éléments conventionnels de la robotique industrielles, où le robot réalise les tâches en autonomie, sans aucune intervention humaine. Avec la possibilité de remplacement des éléments de sécurité matérielles (barrière, grille de protection, etc.) au profit de dispositifs immatériels (barrière optique, scanner laser, etc.) ;
- Les solutions cobotiques qui nécessitent la présence humaine pour l'accomplissement des tâches. Dans ce cadre, les cobots, les exosque-

lettes ou encore les robots manipulateurs téléopérés sont manipulés par les utilisateurs. Ces solutions cobotiques sont employées pour aider l'opérateur à accomplir sa tâche en guidant ses mouvements, en démultipliant l'effort exercé, ou en compensant le poids d'un objet ou d'un outil ;

- Les robots manipulateurs collaboratifs qui peuvent partager le même espace de travail et des tâches avec les opérateurs humains. Parmi les applications typiques de cette catégorie, on retrouve par exemple : le déplacement des produits fabriqués, la préparation d'outils (de montage, par exemple), etc.

Ces nouveaux dispositifs technologiques sont de plus en plus présentés comme une clé de modernisation et de compétitivité des entreprises, en combinant le savoir-faire et le pouvoir décisionnel de l'être humain avec la force, l'endurance et la précision du robot. Cette combinaison est présentée comme une solution potentielle pour répondre aux besoins de flexibilité et d'agilité liées à la variabilité de production et à la mondialisation de la concurrence en offrant des nouvelles possibilités d'assistance pour des tâches parfois difficilement automatisables, tout en contribuant également à l'amélioration des conditions de travail. Si le déploiement de ces technologies reste encore limité et ne remplit pas totalement ces promesses, leur futur semble très prometteur.

Ces nouveaux dispositifs technologiques donnent lieu à un débat autour d'un ensemble de questions englobant la sécurité des futurs utilisateurs (INRS, 2018), la rentabilité de ces investissements et leurs impacts sur la productivité (Bounouar et al., 2020 ; Cherubini et al., 2016), la qualité et les conditions de travail des opérateurs humains (Haeflinger, 2017). De ce fait, ils ont renforcé le besoin d'une conception qui ne se focalise pas seulement sur l'élément technologique, mais aussi sur son utilisation potentielle en prenant en compte le travail réel, ces particularités et ces sources de variabilités pour concevoir des systèmes Humains-Robots favorisant un travail en sécurité, en qualité et élargissant les marges de manœuvres des opérateurs humains afin de pouvoir gérer les variabilités et les difficultés rencontrées en situation de travail.

Pour enrichir ce débat, nous proposons dans cette communication un cadre méthodologique de conduite des projets cobotiques en prenant en compte les différents enjeux de ce type de projets (sécurité, faisabilité, rentabilité, etc.) et en s'inspirant des principales disciplines intégrant le travail réel et les futurs utilisateurs dès les premières étapes du processus de conception. Ce cadre méthodologique vise à orienter vers une conception des systèmes humains-robots alliant sécurité, rentabilité, et amélioration des conditions de travail.

Après avoir présenté ce contexte technologique et les questions induites, nous présenterons brièvement dans la partie suivante des exemples d'approches de conception centrées sur l'Humain. Nous discuterons ensuite les étapes et les particularités de chacune de ces approches et nous présenterons par la suite notre proposition de cadre méthodologique de conception des systèmes cobotiques.

2 LES APPROCHES DE CONCEPTION CENTRÉES SUR L'HUMAIN

2.1 La conception centrée utilisateur

C'est dans (Norman et Draper, 1986) que le terme «user-centered design » fut pour la première fois employé pour exprimer un type de conception dans lequel l'utilisateur de l'application, appelé « end-user », influence la conception elle-même. Ce terme a été utilisé par la suite dans plusieurs publications et manifestations scientifiques.

La norme ISO 9241 (ISO 9241, 2010) fournit un cadre pour la conception centrée sur l'être humain. Complémentaire aux méthodologies de conception existantes, ce cadre offre une perspective centrée sur l'être humain qui peut être intégrée dans différents processus de conception et de développement d'une manière adaptée au contexte de chaque cas particulier. Une approche centrée sur l'être humain devrait suivre, entre autres, les principes énumérés ci-dessous :

- La conception est fondée sur une compréhension explicite des utilisateurs, des tâches et des environnements :

Les produits, systèmes et services devraient être conçus de manière à tenir compte des personnes qui les utiliseront et qui pourraient être touchées (directement ou indirectement) par leur utilisation.

- Les utilisateurs sont impliqués tout au long de la conception et du développement :

La participation des utilisateurs à la conception et au développement constitue une source précieuse de connaissances sur le contexte d'utilisation, les tâches et la façon dont les utilisateurs sont susceptibles de travailler avec le futur produit.

- La conception est pilotée et affinée par une évaluation centrée sur l'utilisateur :

L'évaluation des conceptions avec les utilisateurs et leur amélioration en fonction de leurs commentaires constituent un moyen efficace pour réduire les risques qu'un système ne réponde pas aux besoins des utilisateurs ou de l'organisation (y compris les exigences cachées ou difficiles à spécifier explicitement). Une telle évaluation

permet de tester les solutions de conception préliminaire et contribuer à l'élaboration des solutions progressivement affinées.

- Le processus est itératif :

L'itération implique que les descriptions, les spécifications et les prototypes soient révisés et affinés lorsque de nouvelles informations émergent en cours de conception, au fur et à mesure d'affinement de la compréhension des utilisateurs et de leurs tâches. Ceci, afin d'éliminer progressivement l'incertitude pendant le développement des systèmes interactifs (humains-machines) et de réduire le risque que le système en cours de développement ne réponde pas aux besoins des utilisateurs.

- L'équipe de conception comprend des compétences et des perspectives multidisciplinaires :

L'équipe de conception centrée sur l'utilisateur doit être suffisamment diversifiée pour veiller sur la prise en compte des différents aspects liés à la conception et pour pouvoir prendre des décisions sur les compromis à faire. Un avantage supplémentaire d'une approche multidisciplinaire est que les membres de l'équipe prennent davantage conscience des contraintes et des réalités des autres disciplines ; par exemple, les experts techniques peuvent devenir plus sensibles aux problèmes des utilisateurs et les utilisateurs peuvent devenir plus conscients des contraintes techniques.

Un exemple de mise en œuvre de cette démarche a été partagé par (Loup-Escande et al., 2016) dans le cadre d'un projet visant la conception d'un environnement virtuel favorisant l'apprentissage de concepts scientifiques. Les contributions effectives de plusieurs profils d'utilisateurs (les enseignants, les élèves) à la compréhension et à la spécification des contextes d'usage, à l'identification des besoins des utilisateurs et aux évaluations de solutions intermédiaires et finales ont été décrites dans ce retour d'expérience.

2.2 La conception centrée sur l'activité

Comme son nom l'indique, la conception centrée sur l'activité souligne l'importance d'une analyse et d'une compréhension des activités individuelles et collectives développées et mises en œuvre par les opérateurs dans leur quotidien de travail durant le processus de conception.

Ces étapes essentielles permettront d'alimenter le processus de conception et de l'orienter vers des choix en capacité d'élargir les marges de manœuvre des futurs utilisateurs de telle manière à pouvoir mettre en œuvre des moyens cohérents pour faire face à la variabilité du travail (technique, organisationnelle, etc.) dans l'objectif de préserver leur santé et d'atteindre les objectifs de productivité.

Les approches de conception développées dans ce cadre s'appuient sur une analyse stratégique des enjeux du projet, la construction de diagnostics opérants visant la compréhension des activités réelles de travail, la conduite de simulations du travail permettant de se projeter dans l'activité future probable, la formalisation des résultats des simulations et l'accompagnement du projet jusqu'à son démarrage.

L'ensemble des étapes de cette démarche se fonde sur une mobilisation et une participation active de l'ensemble des acteurs concernés par le projet, y compris les opérateurs (Benchekroun, 2016 ; Bounouar et al., 2019). Dans ce sens, l'une des finalités centrales d'une approche ergonomique est l'aboutissement à des accords de développement conjoint de la santé, de la performance, et des personnes en centrant le dialogue entre les différentes parties prenantes du projet sur le travail et les activités mobilisées en situation réelle ou simulée (Benchekroun, 2016).

2.3 Le Design Thinking

Le Design Thinking (DT) rendu populaire par la compagnie IDEO et l'Université de Stanford, est une approche basée sur l'empathie et utilisant des méthodes et des outils pour permettre à des équipes multidisciplinaires d'innover en mettant en correspondance attentes des utilisateurs, faisabilité technologique et viabilité économique. (Brown and Barry, 2011)

L'objectif de cette démarche est de déplacer les référentiels traditionnels du design qui mettent l'accent sur la résultante du processus à savoir la plupart du temps l'objet créé. Elle s'articule sur des phases cycliques et itératives ayant comme source d'inspiration première la compréhension des individus pour qui on veut innover (utilisateurs finaux), et ce par l'art d'interagir avec eux d'une façon fine et efficace, l'art de l'observation, du recadrage et du prototypage rapide pour mieux approfondir la compréhension du terrain et enrichir les propositions de solutions. Dans cette démarche, plutôt que de développer tout le produit (service, espace, technologie, organisation, etc.) pendant des mois et de le présenter sous sa forme finale au client pour avis, il ne faut développer que les briques demandées et tester avec les utilisateurs l'usage au moyen de versions bêta et échanger avec eux en boucles courtes, en contexte réel, jusqu'à la finalisation et la mise en œuvre. (Mathieu and Hillen, 2016)

Il existe plusieurs variantes des processus en Design Thinking, le plus populaire est celui développé par la d.school de l'université de Stanford qui définit le proces-

sus en cinq étapes qui s'enchaînent logiquement mais qui ne doivent pas être prises comme un processus linéaire (The Bootcamp Bootleg, 2013) : La phase d'empathie pour comprendre les besoins des utilisateurs, la phase de définition qui vise à exprimer explicitement le problème à résoudre et l'angle d'attaque du problème, la phase d'idéation durant laquelle l'ensemble des participants du groupe de conception génèrent une diversité d'alternatives de conception pour répondre au à l'objectif défini, puis la phase du prototypage pour permettre aux idées de sortir au monde réel et la phase de test pour recueillir les avis des utilisateurs, d'améliorer les solutions, d'affiner et de continuer à apprendre davantage sur les utilisateurs pour gagner encore une fois en empathie afin d'enrichir les prochaines itérations.

D'autres exemples intéressants d'approches de conception centrées sur l'humain existent (Sun H. et al., 2013 ; Sun X. et al., 2018).

3 LES ENJEUX DE LA CONCEPTION DES SYSTÈMES COBOTIQUES

La conception d'un système collaboratif humains-robots est une tâche complexe. Ceci est dû à un ensemble d'enjeux complémentaires mis en jeu durant ce type de projets de conception.

Tout d'abord, l'enjeu de sécurité a une place essentielle durant le processus de conception d'un système interactif incluant des robots collaboratifs. En fait, contrairement aux robots industriels isolés par des grilles et barrières physiques, le partage physique d'un même espace de travail entre les robots collaboratifs et les opérateurs humains rend la notion de risque prédominante.
Malgré l'implantation de différentes mesures de protection intrinsèques (fonctions de sécurité intégrées, capteurs de couple, etc.) et respect des exigences de sécurité normatives (ISO 10218-1, 2011) par les fabricants de cobots, les risques de ces nouveaux moyens technologiques sont présents pour les utilisateurs. Dans ce sens, Il est important de distinguer le robot, qui est considéré au sens de la directive machines[1] 2006/42/CE comme une quasi-machine qui ne peut assurer à elle seule une application définie, et le système cobot comprenant le cobot, son effecteur (une pince, une visseuse, etc.), et l'ensemble des éléments de péri-robotique et de l'environnement de travail. Ce dernier n'est pas « sûr » par définition, mais sa sécurité doit être étudiée et assurée dans le contexte de l'utilisation. A titre d'exemple, les effecteurs (pince, visseuse, etc.), les objets manipulés, la vitesse, etc. peuvent être générateurs de risques de pincement, de collision, de coincement, etc.

[1] Les Directives machines rapprochent les législations des États membres de l'union européenne relatives aux machines. Elles visent à assurer la sécurité des personnes sur le lieu de travail et à réduire les risques

D'autre part, l'introduction d'une nouvelle technologie dans un système industriel constitue un changement majeur au niveau de l'activité des opérateurs humains et de l'organisation. En ce sens, introduire une technologie, c'est aussi agir sur un système socio-organisationnel (Bobillier-Chaumon, 2016). Ceci peut avoir des impacts sur le savoir-faire développé par les opérateurs tout au long de leurs carrières pour effectuer un travail de qualité et gérer les variabilités rencontrées tout en préservant leur santé.

Puis, il ne faut pas oublier que l'introduction d'une cellule de robotique collaborative, au même titre que tout autre moyen de production, est un investissement important qui est souvent conditionné de façon prédominante par des critères économiques. Il est naturel que les dimensions liées aux coûts engendrés (pour l'achat, la mise en fonction et l'entretien de la cellule robotique), à l'impact sur l'efficacité des postes de travail concernés, et au retour sur investissement soient discutées et prises en compte dans les processus de prise de décision et de conception.

Le challenge durant la conduite de projets cobotiques consiste à trouver, pour chaque cas de poste de travail industriel à cobotiser, le compromis entre les différents enjeux essentiels liés à l'introduction de cette nouvelle technologie.
En se basant sur la richesse des disciplines de conception centrées sur l'humain présentées précédemment et sur la connaissance de la réglementation en vigueur, nous proposons dans la partie suivante un cadre méthodologique en construction, visant à aider les concepteurs des systèmes humains-robots de prendre en compte les différents enjeux présentés dans cette partie, dans un objectif d'aboutir à un système humains-robots alliant sécurité, acceptabilité et rentabilité.

4 PRÉSENTATION ET MISE EN PERSPECTIVE DE LA PROPOSITION DU CADRE MÉTHODOLOGIQE DE CONCEPTION DES SYSTÈMES HUMAINS-ROBOTS

Avant de commencer les étapes de conception, pour veiller à la bonne prise en compte de l'aspect multi-enjeux précité, l'équipe de projet devrait être pluridisciplinaire. C'est d'ailleurs une des bases de la conceptions centrée-utilisateurs (section 2.1). Une équipe de projet pluridisciplinaire devrait inclure les opérateurs concernés par le projet, des représentants de la direction (pour la discussion de l'investissement), des managers (de production, de maintenance, de qualité, de la sécurité), un ergonome et un intégrateur de robot.

Au début du projet, l'équipe pluridisciplinaire serait amenée à analyser la situation actuelle de l'organisation, du poste de travail et des tâches à cobotiser. Plus préci-

sément, il s'agira, d'une part d'analyser les enjeux du projet en définissant les objectifs, en identifiant les postes à cobotiser, les personnes impactées, leurs attentes et les contraintes économiques et organisationnelles liées au projet (budget, importance du poste dans le processus de production, etc.), et d'une autre part, d'analyser l'activité des opérateurs à travers des observations en situation réelle, des entretiens de compréhension, et une analyse des données et documents liés aux postes de travail concernés (descriptifs des postes, objectifs de performance, suivi de productivité et de qualité, données de santé et de sécurité, etc.).

En se basant sur les résultats de la phase d'analyse de l'existant, les étapes de conception devront être conduites de manière participative et itérative (principes de la conception centrée utilisateurs : section 2.1). En commençant par une étape importante d'idéation de scénarios de cobotisation (comme au Design Thinking : section 2.3). Cette étape essentielle va contribuer à favoriser l'approche participative en donnant la parole à tous les membres de l'équipe de conception, y compris les opérateurs humains, pour proposer des pistes de solutions qui doivent être discutées, évaluées et hiérarchisées à travers des simulations organisationnelles (simulations rapides en maquettes 2D ou 3D, par exemple).

Ensuite, les pistes de solutions les mieux classés doivent être étudiés dans un objectif de choix des solutions technologiques adaptées, afin également de déterminer leurs faisabilités et d'estimer leurs enveloppes budgétaires. Si les principes de solutions et leurs coûts potentiels sont acceptés par l'organisation et les opérateurs concernés, une étape de simulation fonctionnelle (tirant bénéfice des nouvelles technologies de visite virtuelle et d'analyse ergonomique de poste) permettrait l'évaluation du fonctionnement spatial et temporel et de son impact potentiel sur la performance du système.

Après l'étude de faisabilité et l'évaluation de la rentabilité économique de l'investissement, une étape d'analyse des risques et d'évaluation de l'utilisabilité et de l'acceptabilité de la solution par les opérateurs est nécessaire pour déterminer si la solution est potentiellement convenable, et mérite d'être prototypée, ou s'il y a une nécessité de faire des itérations pour améliorer des aspects de la solution.

Ces itérations et retours vers la phase d'étude de faisabilité pour modifier la solution proposée, ou vers la phase d'idéation, pour revoir les scénarios de cobotisation doivent d'être envisageables pour éviter d'aller vite vers des investissements inutiles. Même après la validation d'une solution finale et son implantation, des évaluations après la mise en fonctionnement permettront de recueillir le retour des utilisateurs et la prise des décisions nécessaires pour éviter tout rejet de la nouvelle technologie après investissement.

Les étapes présentées ci-dessous sont schématisées sous forme d'un cadre méthodologique de conduite des projets cobotiques (figure 1). Ce cadre méthodologique vise à orienter vers des solutions systèmes humains-robots alliant sécurité, acceptabilité et productivité.

5 CONCLUSION

La cobotique présente de nombreuses perspectives pour le secteur industriel, englobant l'amélioration de l'agilité des systèmes de production et l'amélioration des conditions de travail des opérateurs humains. Ces nouveaux moyens technologiques engendrent des points de vigilance liés à la bonne prise en compte des enjeux multidisciplinaires de la robotique collaborative (Sécurité, rentabilité et conditions de travail).

Dans cet article, différentes approches de conception centrées sur les utilisateurs finaux ont été présentées. Ensuite, les enjeux multidisciplinaires liés à la robotique collaborative ont été discutés. Puis, un cadre méthodologique de conception des systèmes humains-robots a été élaboré. Ce cadre méthodologique, comprenant les étapes de conception avec leurs livrables, leurs outils et données d'entrées nécessaires, met en avant l'importance de la structuration participative de l'équipe de conception, des étapes préliminaires de la compréhension et d'analyse de l'activité en cours et des étapes itératives de conception et d'évaluation pour parvenir à une conception combinant performance productive, santé et sécurité.

Pour un premier temps, ce cadre méthodologique a été mis en pratique –aux conditions de laboratoire- lors d'un processus de conception d'une cellule robotique collaborative visant l'amélioration d'un poste de travail de recyclage des boites plastiques contenant un produit de nettoyage (Bounouar et al., 2020). Au cours de cette expérience, l'activité manuelle a été analysée par le biais d'observations et d'entretiens avec les utilisateurs. Des scénarios d'amélioration ont été proposés, discutés et priorisés. Ensuite, une étude de faisabilité a été réalisée et a conduit à la réalisation des prototypes techniques des solutions retenues. Ces prototypes ont permis d'évaluer les solutions proposées et de recueillir les réactions des utilisateurs volontaires. Actuellement, ce cadre méthodologique est en train d'être mis en œuvre dans un contexte plus formel ; un projet d'étude des possibilités d'assistance des opérateurs humains sur un poste de travail de finition d'une PME industrielle française. Cette entreprise produit des pièces mécaniques fragiles et sensibles pour le secteur aéronautique. Cette application industrielle permettra d'enrichir et d'affiner ce cadre méthodologique.

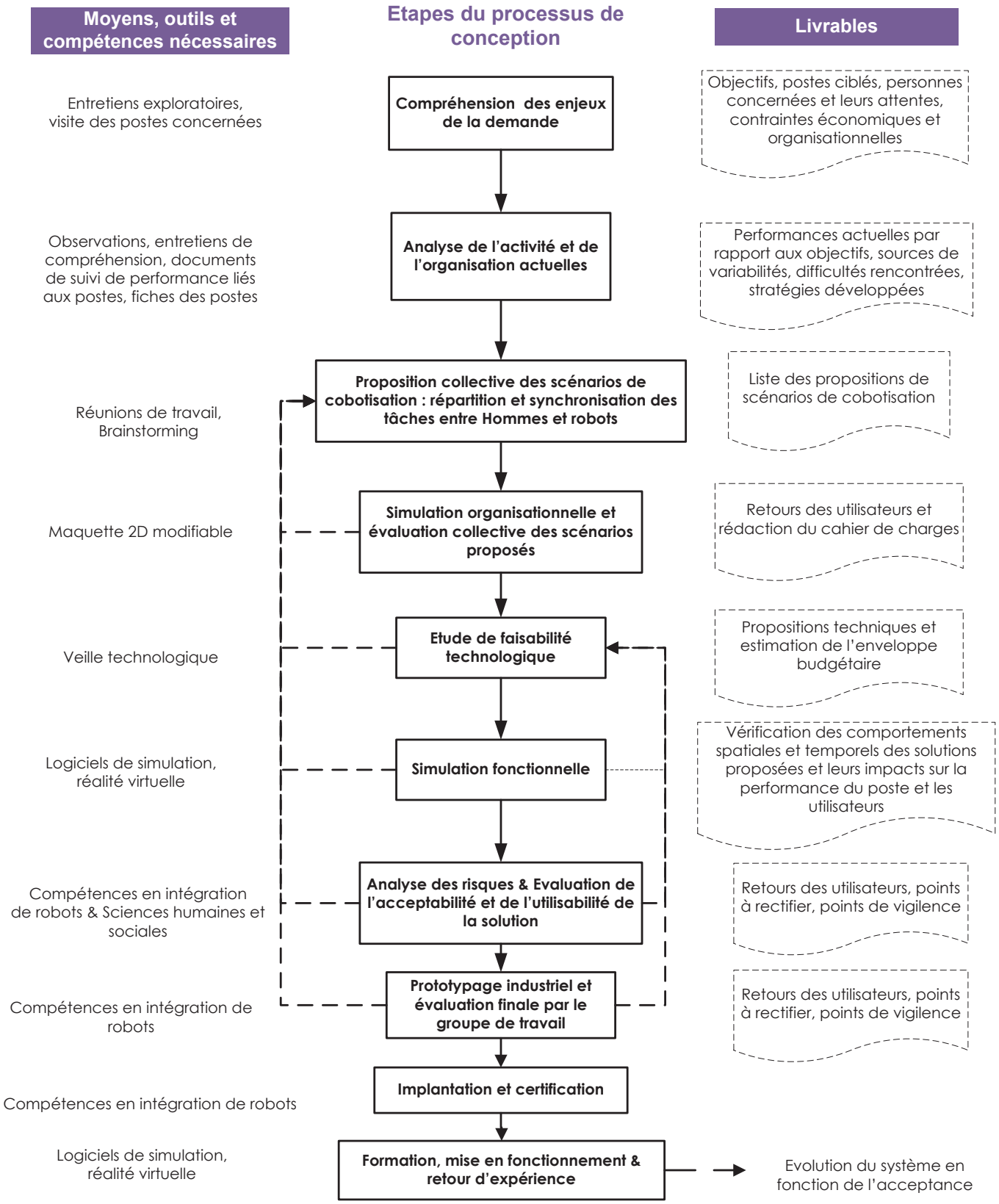


Figure 1: Proposition de cadre méthodologique du processus de conception des systèmes humains-robots

REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet de recherche HECTTOR : L'Humain Engagé par la Cobotisation dans les Transformations du Travail et des ORganisations dans les usines du futur. (ANR-17-CE10-0011).

REFERENCES

Benchekroun, T.H., 2016. Intervenir en ergonomie : analyser le travail pour le comprendre et transformer le travail pour le concevoir. *Actes du 51ème Congrès de la SELF*, Marseille-France.

Bobillier-Chaumon, M-E, 2016. L'acceptation située des technologies dans et par l'activité : premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie du travail et des organisations, Elsevier Masson, 2016, 22 (1),* ff10.1016/j.pto.2016.01.001ff. ffhalshs-01425813f.

Bounouar, M. Bearee, R. Benchekroun, T-H., Siadat, A, 2019. Etat des lieux de la cobotique industrielle et de la conduite de projet associée. *Acte de : 16ème édition S-mart colloque (AIP-Primeca)*, Les Karellis-France, 2019. https://smart2019.event.univ lorraine.fr/243184.

Bounouar, M., Béarée, R., Siadat, A., Klement, N., Benchekroun, T-H, 2020. User-centered design of a collaborative robotic system for an industrial recycling operation. *1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, Meknes, Morocco, pp. 1-6, doi: 10.1109/IRASET48871.2020.9092178.

Brown T., Barry K, 2011. Change by design. *Journal of Product Innovation Management* 28 (381-383).

Haeflinger, R, 2017. Prévention dans le domaine de la robotique collaborative Synthèse de travaux réalisés à l'international. EUROGIP - Paris Réf. Eurogip-129/F. ISBN : 979-10-91290-89-0.

Hägele, M., Nilsson, K., Pires, J. N. and Bischoff, R, 2016. Industrial robotics. In: Siciliano, B. & Khatib, O (Eds.) Springer Handbook of Robotics. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1395-1421.

INRS. 2018. Robots collaboratifs- Risque. http://www.inrs.fr/risques/robots-collaboratifs/ce-qu-il-faut-retenir.html

ISO 10218-1 :2011. Robots et dispositifs robotiques exigences de sécurité pour les robots industriels : partie 1 : robots.

ISO 9241-210. Ergonomics of human-system interaction – part 210: human-centred design for interactive systems. Genève: international organization standardization, 2010.

Loup-Escande Maurice P, Padois P, Measson Y, Bidaud, P (2017) Human-oriented design of collaborative robots. International journal of industrial ergonomics, Elsevier, 57, pp.88- 102. Https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01428778.

Mathieu F, Hillen V (2016) Le design thinking par la pratique, de la rencontre avec l'utilisateur à la commercialisation d'un produit innovant pour les seniors. Eyrolles, ISBN: 978-2-212-14385-0.

Norman D., Draper S, 1986. User Centered System Design. *New Perspectives on Human-Computer Interaction*. L. Erlbaum Associates Inc. Hillsdale, NJ, USA ©1986. ISBN:0898597811.

Safeea M., Neto N., and Bearee R, 2019. Efficient Calculation of Minimum Distance Between Capsules and Its Use in Robotics. IEEE Access, vol. 7, pp. 5368–5373, 2019.

Sallez, Y., Berger, T., Bonte, T., The concept of "safety bubble" for reconfigurable assembly systems, Manufacturing Letters, Volume 24, 2020, Pages 77-81, ISSN 2213-8463. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.03.015.

Sun, H., Houssin, R., Gardoni, M., De Bauvrond, F., 2013. Integration of user behaviour and product behaviour during the design phase: Software for behavioural design approach, International Journal of Industrial Ergonomics (IJIE), vol. 43.

Sun, X., Houssin, R., Renaud, J., Gardoni, M., 2018. A review of methodologies for integrating human factors and ergonomics in engineering design, *International Journal of Production Research*, 57:15-16, 4961–4976. DOI: 10.1080/00207543.2018.1492161

The bootcamp bootleg. 2013. Http://dschool.stanford.edu/use-our-methods/ Accessed 30 september 2019.

Vicentini, F., 2020. Collaborative robotics: a survey. *Journal of Mechanical Design*. doi:10.1115/1.4046238.

EXPLORATION DE DONNEES DE PLANIFICATION POUR LA MODELISATION DES INCERTITUDES DUES A L'HORIZON GLISSANT

Walid Khellaf, Jacques Lamothe

Université de Toulouse, Centre Genie Industriel IMT Mines Albi, Albi, France
{Walid.Khellaf, Jacques.Lamothe}@mines-albi.fr

Romain Guillaume

Université de Toulouse, IRIT, Université de jean jaures, Toulouse, France
Romain.guillaume@irit.fr

RESUME : Dans une chaine logistique, la planification tactique à horizon glissant est utilisée pour synchroniser la production et la distribution. Ainsi, un acteur qui reçoit des planifications de ses partenaires (clients ou fournisseurs) peut chercher à étudier leur incertitude en analysant les variations de celles reçues dans le passé. Cet article propose un processus de modélisation d'incertitudes en utilisant une méthode de classification non supervisée pour identifier les horizons de re-planification ayant des niveaux de variation similaires, puis d'estimer l'incertitude sur les groupes d'horizons obtenus. La méthode proposée est appliquée à un cas pratique industriel. Nous discutons les résultats obtenus qui mettent en avant des comportements spécifiques de décideurs.

MOTS-CLES : *Planification tactique, Horizon glissant, Incertitudes, classification non supervisé.*

1 INTRODUCTION

Dans une chaîne logistique de partenaires indépendants, la synchronisation des plans directeurs de production (PDP) et de distribution est souvent obtenue par un processus de planification des ressources de distribution (DRP), une méthode permettant de définir sur un horizon donné, les besoins en approvisionnement le long de la chaine logistique (Martin André J 1996).
Dans ce processus, les partenaires s'échangent des plans à horizon glissant révisés périodiquement en fonction des actualisations des plans reçus des partenaires, ou des perturbations internes tels que changement dans les demandes client, les prévisions de demande, des pannes machines, des non-qualités, de l'absentéisme, des retards dans les dates de livraison des matières premières. Ces révisions fréquentes entrainent une nervosité dans le système de planification (Steele 1975), accentuent l'effet bullwhip (Hau L. Lee 1997) et engendrent une perte de confiance sur la crédibilité des plans. Nous cherchons ainsi à estimer l'incertitude sur les planifications reçues.
L'instabilité, la nervosité d'un plan et les impacts sur les systèmes de planification ont été souvent étudiés. (Steele 1975) a nommé cet effet de "system-nervousness" dans les systèmes MRP. Plusieurs mesures de nervosité ont été proposées (Steele 1975), (Jensen T 1993). (Vàncza J 2008) mesure l'imprécision par une moyenne des différences absolues entre la quantité réalisée et les différentes re-planification.
(Genin P 2003) et (Van Donselaar 2000) ont proposé de réduire la nervosité en prenant en compte des limitations sur les modifications entre deux re-planifications. (Herrera C Jun 2009) et (Gharbi H 2008) ont exploré la coordination de la planification agrégée tactique et la planification détaillée afin d'assurer une planification robuste et réactive aux perturbations. Une autre approche est la modélisation de l'incertitude dans le processus planification (G. B. Guillaume R 2013) et (Grabot B 2005)). Néanmoins la fuzzyfication du plan d'approvisionnement qui est l'entrée de ces approches est à notre connaissance peu investiguée et est souvent faite à dire d'expert.
Dans ce papier, nous proposons une méthode de fuzzyfication basée sur l'étude des données historiques. Des méthodes d'exploration des données permettent d'enrichir la compréhension et l'évaluation d'un plan dans un processus de planification à horizon glissant, et ainsi d'estimer l'incertitude des plans. L'approche est intrinsèque et ne s'appuie pas sur d'autres variables externes pour expliquer l'incertitude.
L'article est organisé comme suit : dans la première section le problème est décrit et le processus global de modélisation d'incertitudes est présenté. Par la suite, nous appliquons notre approche sur des données réelles d'une planification logistique et interprétons les résultats obtenus sur cette application.

2 DESCRIPTION ET FORMULATION DU PROBLEME

2.1 Planification à l'horizon glissant

L'actualisation des plans à horizon glissant peut engendrer une importante nervosité. Notre objectif est de caractériser les écarts de quantités re-planifiées, entre 2 planifications successives et/ou entre une planification et sa réalisation. Afin de limiter les effets de bord entre deux périodes, nous nous focalisons uniquement sur les données cumulées des plans.
La figure 1 montre un exemple de quantités re-planifiées sur un horizon de 6 semaines, où $Q_{i,j}$ représente la quantité cumulée de production programmée pour la période j dans le plan réalisé en période i. Cette figure

introduit aussi la notion d'horizon: l'horizon h caractérise les quantités planifiées h périodes avant leur réalisation. Ainsi la quantité $Q_{i,j}$ appartient à l'horizon (j-i). Cet article fait l'hypothèse que les incertitudes sont fonction de l'horizon car les leviers de décisions du partenaire qui transmet le plan sont aussi fonctions de l'horizon.

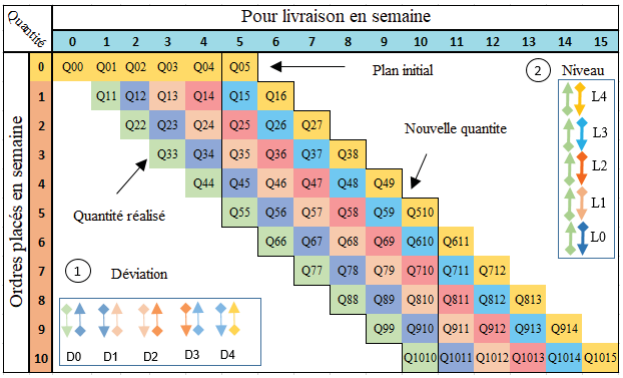


Figure 1 : Les plans de planification dans un horizon glissant (N=10,H=6)

Les notations qui seront utilisées tout au long de cet article seront les suivants :

$\boldsymbol{P}_i$: plan reçu/émis à la période i, i∈[1..N].

$\boldsymbol{Q}_{i,j}$: quantité prévu dans le plan Pi pour la période j. i∈[1..N], j∈[i..(i + H)]

H: taille maximum de l'horizon glissant

$\boldsymbol{D}_{i,h} = \boldsymbol{Q}_{i,i+h} - \boldsymbol{Q}_{i+1,i+h}$:écart entre l'horizon h et h-1 pour le plan i, 1∈[1..H]. (Les déviations (1) dans la figure 1)

$\boldsymbol{L}_{i,h} = \boldsymbol{Q}_{i,i+h} - \boldsymbol{Q}_{i+h,i+h}$: écart à l'horizon h du plan i et son réalisé, h∈[1..H]. (Les niveaux (2) dans la figure 1)

Nous étudions deux types d'écart formalisés dans 2 matrices : la matrice des déviations (D) ne regardant que l'incertitude d'une étape de re- planification (donc entre deux plans consécutifs), et la matrice des niveaux (L) comparant chaque re- planification au réalisé.

2.2 Matrice des déviations

En s'appuyant sur les travaux antérieurs portant sur les mesures de la nervosité (Jensen T 1993), (Meixell 2005) nous reprenons l'idée introduite par (Herrera C Jun 2009) pour mesurer la nervosité par une moyenne des différences entre les quantités planifiées et ré-planifiées. Dans le premier onglet (1) de la figure (1), on considère que les plans arrivent chaque semaine. Chaque arrivée est une observation de la planification à horizon glissant. Dans chaque observation, on récupère les déviations absolues selon l'équation de (Jensen T 1993) (E1) :

$$D_{Absolu}(i,h) = |D_{h,i}|; i < N \; et \; h < H \qquad (E1)$$

On obtient ainsi une matrice (Observation*Déviation) de déviations absolues (|D|) : chaque ligne i est une observation qui contient les déviations entre le plan reçu à i et celui reçu à i+1.

2.3 Matrice des niveaux

Le deuxième effet de variation est entre les quantités re-planifiée et la quantité réalisée. On peut aussi introduire une mesure absolue (E2) :

$$\boldsymbol{L}_{Absolu}(i,h) = |L_{i,h}|; \; i < N \; ; h < H \qquad (E2)$$

On obtient ainsi une matrice (Observation* Niveau) d'écarts de niveaux absolue (|L|). Chaque ligne est une observation et contient les écarts entre la quantité planifiée et la quantité réalisée.

2.4 Matrice de sens de variation

En s'inspirant sur les travaux de (Marques G 2010), cette matrice (S) identifie les signes des déviations $\boldsymbol{D}_{ih}$ pour mesurer une Augmentation, une Stabilité ou une Baisse dans (E5).

$$\boldsymbol{S}_{ih} = \begin{cases} 1 \text{ si } \boldsymbol{D}_{ih} > 0 \\ 0 \text{ si } \boldsymbol{D}_{ih} = 0 \\ -1 \text{ si } \boldsymbol{D}_{ih} < 0 \end{cases} \qquad (E5)$$

3 PROCESSUS DE CARACTERISATION D'INCERTITUDE

La figure 2 présente les 4 étapes du processus de traitement des données proposé: 1/extraction, 2/ transformation, 3/ regroupement, 4/ modélisation incertitude.

L'originalité de l'approche réside dans un regroupement de différents horizons (3 /) en exploitant les données historiques avec la méthode de classification hiérarchique ascendante (CAH) (Gower J.C 1986).

Une fois les groupes d'horizons obtenus, les incertitudes sur un plan sont obtenues en se basant sur les informations portées par chaque groupe. Cette analyse permet de comprendre où se trouvent les perturbations les plus importantes ? et comment elles évoluent au cours de l'horizon ?

3.1 L'extraction

La démarche doit être adaptée par rapport à la taille des données disponibles (Kantardzic M 2011). Deux situations sont à distinguer: (i) celles où l'historique est important (N> 2H), (ii) de celles où l'historique est réduit (N≤H). Dans le cas (i), l'extraction peut être limitée sur des périodes « j » pour lesquelles le réalisé est connu. Auquel cas, la matrice (L) est pleine et contient de nombreuses observations. Dans le cas (ii), aucune donnée (triangles jaune de la figure 2) n'est éliminée. Ainsi, le plan fait à des horizons lointains n'est pas connu pour les premières réalisations observées. Et le réalisé des horizons finaux des dernières observations ne sont pas connus non plus. Par suite, la matrice (L) sera partiellement vide.

3.2 Transformation

Les matrices des écarts sont calculées. Dans le cas (i), les matrices sont pleines et exploitables sans effet particulier. Dans le cas (ii), la matrice des écarts de niveaux (L) peut ne contenir que très peu d'observations pour des tailles d'horizon H grands (H=N) ce qui rend son exploitation inutile. La matrice des déviations (D) et des signes (S) sera toujours plus dense. Néanmoins, chaque modèle de déviation sera basé sur un ensemble de dates « j=i+h » différents.

3.3 Regroupement des horizons

Nous avons utilisé la méthode de classification hiérarchique ascendantes (CHA) pour construire des groupes d'horizons similaires. C'est une façon de compacter les horizons et d'identifier des structures dans les horizons.
Cette méthode d'exploration descriptive des données (Kantardzic M 2011) permet de produire des nouvelles informations non négligeables basées sur l'ensemble des données disponibles.
Dans la première itération, nous avons utilisé la distance euclidienne (E6) pour mesurer la ressemblance entre deux horizons ou M est une matrice normalisée de la matrice $|D|$ou une matrice normalisée de la matrice $|L|$.

$$\mathrm{Dist}(h_1, h_2) = \sqrt{\sum_i^n \left(M_{I,h1} - M_{i,h2}\right)^2} \qquad \text{(E6)}$$

Dans les itérations suivantes : nous utilisons l'écart de Ward $\Delta(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$ pour regrouper deux groupes (A, B). Le regroupement provoque une minimisation de la dispersion à l'intérieur de chaque groupe (Kaufman L 2005). Cet écart est défini comme :

$$\Delta(A, B) = \frac{n_A * n_B}{n_A + n_B} \mathrm{dist}(G_A, G_B)^2 \rightarrow Min \qquad \text{(E7)}$$

G_A : Centre de gravité associé au groupe A
n_A: Effective de groupe A

3.4 Estimation des incertitudes

Les informations obtenues dans chaque groupe d'horizon servent à estimer les incertitudes d'un plan.
Il existe plusieurs types de méthodes d'estimation des incertitudes : intervalle Minimax, ou intervalle interquartile. Ici, deux estimations d'incertitudes par l'intervalle Minimax sont utilisées : une estimation basée sur les écarts entre les niveaux (L) et l'autre sur les déviations (D).

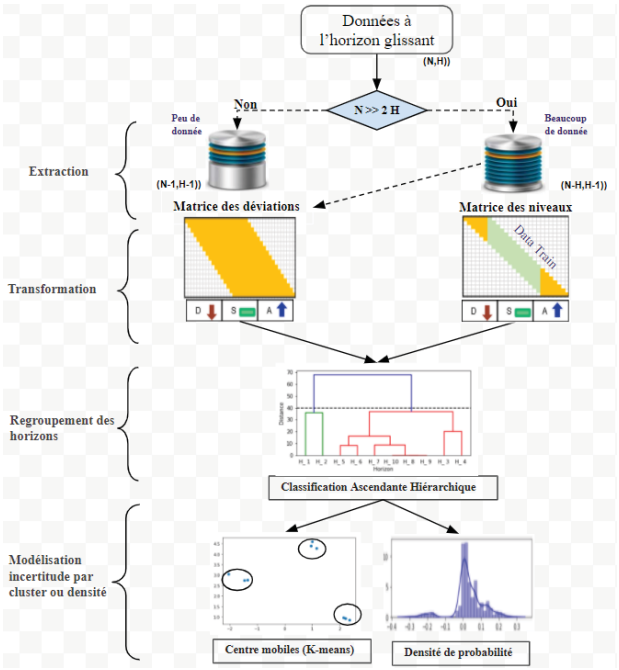


Figure 2:Processus de caractérisation des incertitudes

4 APPLICATION NUMERIQUE

4.1 Contexte

Le projet ANR « Cloud Adaptation for an Agile Supply Chain » (CAASC) vise à améliorer l'agilité et la réactivité d'une chaine d'approvisionnement dans une plateforme cloud qui regroupe les différentes entités d'une chaine logistique.

Une partie de la chaine logistique du partenaire industriel est un cas d'utilisation pour appliquer les modèles développés (Tiss S 2019).

Notre travail a pour but de quantifier les incertitudes dans les plans reçus par chaque acteur de la chaîne. Ici, à titre d'exemple, nous considérons les besoins d'approvisionnement reçus par un centre de distribution central (CDC) en provenance d'un pays X pour un produit A.

4.2 Description des données :

Pour sa planification tactique, le CDC utilise des plans à horizon glissants sur 25 semaines révisés toutes les semaines (N = 42 observations).
Dans chaque planification, la quantité de la première période du plan d'approvisionnement est exécutée dans les systèmes opérationnels, les prévisions des 23 périodes suivantes sont ajustées, et une autre nouvelle quantité planifiée arrive en fin d'horizon.
Notre objectif est d'identifier, analyser et regrouper les horizons de planification ayant des écarts similaires. Deux angles différents ont été utilisés selon que le regroupement est basé sur les déviations (D) ou les niveaux (L).

4.3 Ecart entre les horizons successifs

Dans cette analyse, nous exploitons la matrice de déviation ($|D|$).

	h0	h1	h 2	h3	…	h21	h22	h23	h24
Ob_0	520	0	0	0	…	0	0	0	0
Ob_1	1762	971	971	971	…	971	971	971	971
Ob_2	1097	0	0	0	…	0	0	0	0
Ob_3	449	0	540	1540	…	2474	2474	2456	2474
Ob_4	957	5158	0	0	…	0	0	0	0
…..	…..	…..	…..	…..	…	…..	…..	…..	…..

Tableau 1:Les déviations entre le niveaux i et le niveau i+1

Dans le prétraitement de nos données de la matrice de déviation, nous utilisons une normalisation Minimax :

$$(\boldsymbol{D}_{New}) = \frac{|D_{i,h}| - \mathrm{Min}(|\mathrm{D}_h|)}{Max(|D_h|) - Min(|D_h|)}$$

Cette transformation permet d'amener tous les écarts de chaque observation dans la plage [0 ,1] comme ceci :

	h0	h1	h 2	h3	…..	h21	h22	h23	h24
Ob_0	0.05	0.0	0.0	0.0	…..	0.0	0.0	0.0	0.0
Ob_1	0.18	971	0.19	0.46	…..	0.16	0.16	0.16	0.16
Ob_2	0.11	0.0	0.0	0.0	…..	0.0	0.0	0.0	0.0
Ob_3	0.04	0.0	0.25	0.25	…..	0.40	0.40	0.40	0.40
Ob_4	0.09	1.0	0.0	0.0	…..	0.0	0.0	0.0	0.0
…..	…..	…..	…..	…..	…..	…..	…..	…..	…..

Tableau 2:Matrice de déviation normalisé Minimax

La mesure de ressemblance définie en (E6) sur la matrice de déviation normalisée permet de calculer la distance entre chaque paire d'horizon. La mesure de distance utilisée accorde une valeur maximale à deux horizons complètement différents et minimale (0) à deux horizons identiques. Ces distances peuvent être visualisées dans la représentation ci-dessous.

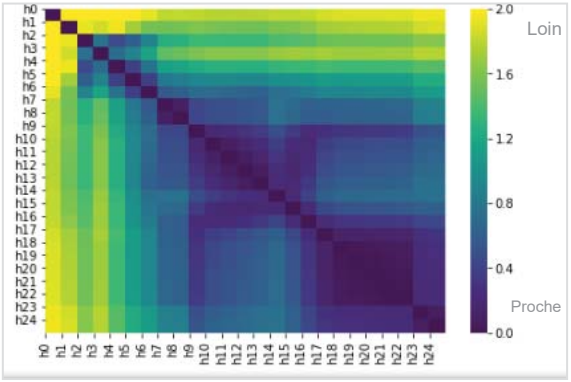


Figure 3: distance euclidienne entre deux paires d'horizons sur |D|

D'après cette représentation de similarité, nous constatons qu'à partir de l'horizon h9 et jusqu'à h24, les quantités re-planifiées sont faiblement modifiées : les planificateurs ont tendance à faiblement adapter la planification. Par contre les horizons (h0, h1) s'éloignent beaucoup des autres horizons. Ce qui signifie qu'il y a des nombreuses modifications à court terme lors de l'exécution d'un plan.

4.3.1 Regroupement des horizons

Nous appliquons la classification hiérarchique ascendante (CHA) sur la matrice de distance générée. L'arbre ci-dessous permet de visualiser la structure « naturelle » (Kantardzic M 2011) des groupes des horizons.
L'arbre peut se couper à plusieurs hauteurs selon le choix du décideur (ligne unie) dans le nombre de regroupement souhaité.
Par exemple, le tiret pointillé sur la figure 4, génère trois groupes qui sont la meilleure répartition des horizons en trois classes bien différentes.

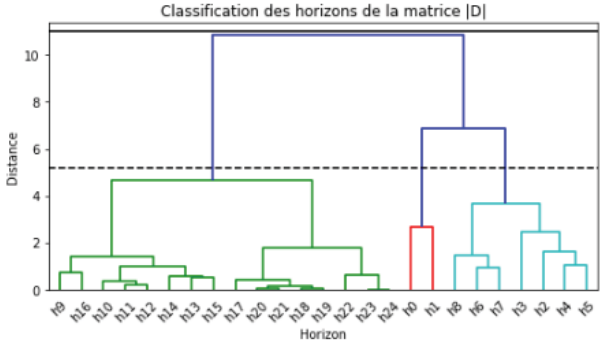


Figure 4:Les groupes d'horizons similaires

	Horizons |D|	Sens de variation des écarts		
		A (%)	S (%)	B(%)
Full ensemble	{ h0, h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, h8, h9, h10, h11, h12, h13, h14, h15, h16, h18, h19, h20, h21, h22, h23, h24}	10	48	42
Cluster 1	{ h0, h1}	17	25	58
Cluster 2	{ h2, h3 , h4, h5, h6, h7, h8 }	17	50	33
Cluster 3	{ h9, h10, h11, h12, h13, h14, h15, h16, h18, h19, h20, h21, h22, h23, h24}	06	50	44

Tableau 3:Les sous-groupes et leur sens de variation

Nous constatons que les regroupements ont une certaine logique mais l'approche de classification ne le garanti pas : C1 = début de l'horizon, C2= milieu de l'horizon, C3 = fin de l'horizon. De plus le sens de variation obtenu par *(E5)* indique une tendance à surestimer les quantités planifiées : les décideurs ont tendance à diminuer les quantités à chaque re planification, quel que soit le groupe d'horizon considéré. Enfin, chaque cluster a des possibilités de déviation différentes.

4.4 Ecart entre les horizons et le réalisé (L)

Dans cette deuxième analyse, nous étudions la matrice des niveaux ($|L|$) selon la même méthodologie mais en réduisant les données sur les observations où le réalisé des prévisions à H24 est connu. La représentation donne les similarités entre horizons (bleu lorsqu'ils sont proches et jaunes lorsqu'ils sont très différents)

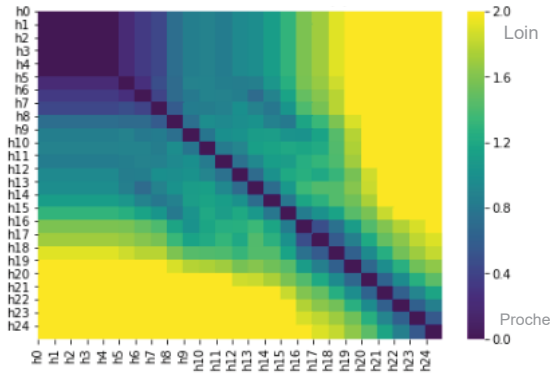


Figure 5:La distance entre les L de paires d'horizons

D'après la matrice de distance sur les L, nous constatons que les quantités planifiées sur les horizons (h0 à h7) correspondent fortement aux quantités réalisées, et nous constatons que les quantités planifiées à partir de l'horizon h16 à h24 ont tendance à s'éloigner de la quantité réalisée. On identifie bien un horizon figé (h0. h7) et un horizon libre (h16.. h24).

4.4.1 Regroupement des horizons

La classification hiérarchique selon la stratégie de « Ward » est appliquée à L (figure 6) pour regrouper les horizons.

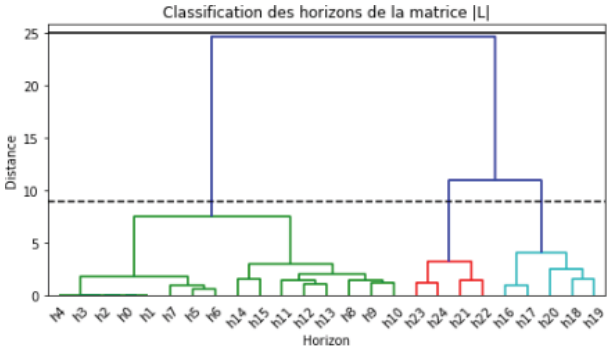


Figure 6: Les groupes d'horizons similaires

Pour un objectif de 3 groupes, les résultats de regroupement des horizons de la matrice L sont donnés dans le tableau ci-dessous. Le tableau montre une franche tendance à surestimer le besoin.

	Horizons |L|	Sens de variation des écarts		
		A (%)	S (%)	B(%)
Full ensemble	{ h0, h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, h8, h9, h10, h11, h12, h13, h14, h15, h16, h18, h19, h20, h21, h22, h23, h24}	**96**	**00**	**04**
Cluster 1	{ h0, h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, h8, h9, h10, h11, h12, h13, h14, h15}	**94**	**01**	**05**
Cluster 2	{ h16, h18, h19, h20 }	**100**	**00**	**00**
Cluster 3	{ h21, h22, h23, h24}	**100**	**00**	**00**

Tableau 4: Les sous-groupes et leur sens de variation

5 ESTIMATION D'INCERTITUDES

Dans ce type d'estimation, nous allons délimiter les variations des plans de re- planification par deux bornes $|Max| = [-Max, +Max]$ une borne inferieure et une borne supérieurs pour les deux matrices, D'après le tableau 4, cela correspond à un écart minimum $\boldsymbol{Min}_{full}$ de -9940 et un écart maximum $\boldsymbol{Max}_{full}$ de 9940. Par contre les bornes obtenues sont très différentes d'un groupe à l'autre. Elles ont une relation d'inclusion comme le montre le tableau suivant :

	A partir de la matrice |D|					
	Taille	**Q2**	**Mean**	**S.dev**	**Q3**	**Max**
Full ensemble	650	972	1235.9	1742	1951	9940
Cluster 1	52	224.5	1358.4	2030	2011	9940
Cluster 2	182	0	972	1453	1522	6434
Cluster 3	416	117	1335.9	1806	1951	6444
	A partir de la matrice |L|					
	Taille	**Q2**	**Mean**	**S.dev**	**Q3**	**Max**
Full ensemble	325	4386	5906	6389	10668	21954
Cluster 1	65	9534	9905.7	3396.8	12270	17220
Cluster 2	52	17112	16444	3269	19153	21954
Cluster 3	208	0	2022	3107	3756	13240

Tableau 5:Caractéristique des deux matrices D&L

La figure 7 représente les intervalles d'incertitudes estimés soit d'après D soit d'après L. Pour chaque matrice cinq courbes sont proposées : une courbe bleue correspondant au plan de planification 42 sur un horizon de planification de 25 périodes (pour lequel uen mesure d'incertitude est recherchée), deux courbes en rouge qui correspondent au bornes inférieures (avec classification (CAH) des horizons et sans classification CAH) et deux autres courbes en vert (avec CAH et sans CAH) correspondent aux bornes supérieures.

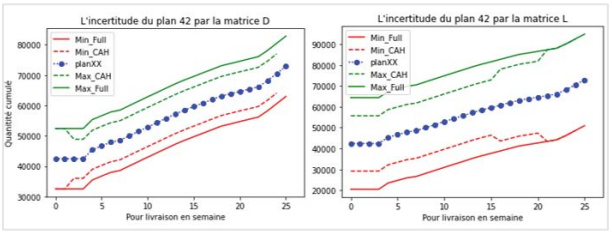


Figure 7 : Synthèse d'estimation d'incertitude par les deux matrices

Dans les deux matrices, nous observons que l'intervalle d'incertitude obtenu par l'intervalle minmax de groupes $\boldsymbol{Min\ Max}_{CAH}$ est plus serré que celui intervalles $\boldsymbol{Min\ Max}_{full}$. Cela montre l'intérêt d'évaluer l'incertitude sur des clusters d'horizon pour obtenir des estimations d'incertitude plus significatives.

Le graphe obtenu par la matrice D montre un fort écartement de l'intervalle $\boldsymbol{Min\ Max}_{Cah}$ sur les horizons proches, et une stabilité de l'intervalle sur le reste de l'horizon. Cela montre que les décisions des décideurs dans l'élaboration du plan planification sur cet horizon varient beaucoup par rapport au reste de l'horizon. Par contre dans la matrice L, l'intervalle $\boldsymbol{Min\ Max}_{Cah}$ s'écarte de plus en plus à partir de l'horizon [h15-h25] qui va avoir une tendance à écarter les quantités planifiées à des horizons lointains par rapport à celles réalisées.

6 CONCLUSION ET SUITE DES TRAVAUX

Cet article a présenté un processus d'estimation des incertitudes liées aux horizons dans des plans tactiques à horizon glissant reçus d'un partenaire d'une chaîne logistique.

L'idée principale a été de transformer les données de la planification à l'horizon glissant en deux types de forme matricielle. La méthode de classification automatique permet de générer des groupes d'horizons ayant des degrés de variation similaires.

Un indicateursur le sens de variation a été utilisé pour donner une visibilité sur les sens de variation des replanifications, afin d'enrichir les informations portées par ces groupes. Enfin à partir de ces groupes on estime les incertitudes de la planification à l'horizon glissant selon les deux matrices D et L. Ces plans incertains pourront ensuite être utilisés comme une entrée dans les problèmes d'optimisations robustes de la planification (T. C. Guillaume R 2017).

Trois pistes de recherche supplémentaires sont envisageables pour estimer les incertitudes: La première est, d'appliquer des méthodes de machine Learning tel que le principe de re- échantillonnage (Bootstrap), le k-means ou le mélange gaussien pour estimer les incertitudes sur les sous-groupes obtenus. La deuxième piste serait de combiner les groupes obtenus par la matrice D à celle de matrice L, pour mieux estimer l'incertitude. La troisième piste serait de développer une méthode pour classer notamment le comportement des partenaires de la chaine logistique sur des groupes de produits (par pays ou fournisseur), et de pouvoir les réincorporer dans le modèle typique. La quatrième perspective serait d'aller vers des mesures de possibilité des incertitudes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'ANR pour le financement du projet CAASC. Ils remercient également les membres du projet qui ont participé à la collecte et l'archivage des données.

REFERENCES

Genin P. «Planification tactique robuste avec usage d'un APS proposition d'un mode de gestion par plan de reference.» *PhD thesis,Ecole des Mines de Paris*, 2003.

Gharbi H, Fontan G, Merce C, Molla M. «Approche a deux niveaux pour la planification réactive.» *7 Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation.* Paris, 2008.

Gower J.C, Legendre P. «Metric and Euclidean properties of dissimilaritycoefficients.» *Journal of Classification*, 1986: 65-90.

Grabot B, Geneste L, Reynoso Castillo G, Vérot S. «Integration of uncertain and imprecise orders in the MRP method.» *J. Intell. Manuf*, 2005: 215–234.

Guillaume R, Grabot B, Thierry C. «Management of the risk of backorders in a MTO-ATO /MTS context under imperfect requirements.» *Elsevier*, 2013: 8060-8078.

Guillaume R, Thierry C, Zieliński P. «Robust material requirement planning with cumulative demand under uncertainty.» *International Journal of Production Research*, 2017: 6824–6845.

Hau L. Lee, V. Padmanabhan,Seungjin Whang. «The Bullwhip Effect in Supply.» *SPRING,Management Science*, 1997: 93–101.

Herrera C, Thomas A. «Un modèle pour limiter la nervosité et l'instabilité du Programme Directeur de Production.» *8ème Congrès International de Génie Industriel, Bagnères de Bigorre,France.*, Jun 2009: 3-8.

Jensen T. «Measuring and improving the planning stability of reorder- point lot-sizing policies.» *International Journal of Production Economics*, 1993: 167-168.

Kantardzic M. *Data mining : concepts, models, methods,and algorithms.* Second edition Ed., Wiley-IEEE Press:Hoboken, NJ., 2011.

Kaufman L, Rousseeuw P. *Finding Groups in Data "An Introduction to Cluster Analysis".* Canada: John Wiley & Sons, 2005.

Marques G, Thierry C, Lamothe J, Gourc D. «Aggregated behaviors for supply chain planning processes simulation and characterization of plan dynamics.» *8 International Conference of Modeling and Simulation MOSIM'10*, 2010.

Martin André J. *Distribution Resource Planning.* Paris: Édition française, 1996.

Meixell, Mary J. «The impact of Capacity, Commonality, and Batching on Schedule Instability.» *Int. J. Production Economics 95* , 2005: 95–107.

Steele, D. C. «The nervous MRP system.» *Journal of Production and Inventory Management*, 1975: 83-89.

Tiss S, Thierry C, Lamothe J, Rousse C. «Toward an Agile Adaptation of Supply Chain Planning: A Situational Use Case.» *Springer International Publishing*, 2019.

Van Donselaar, K., Van den Nieuwenhof, J., and Visschers, J. «The impact of material coordination concepts on planning stability in supply chains.» *International Journal of Production Economics*, 2000: 169-176.

Vàncza J, Egri P, Monostori L,. «A coordination mechanism for rolling horizon planning in supply networks.» *CIRP Annals - Manufacturing Technology 57*, 2008: 455–458.

FUNCTION ANALYSIS OF MANUFACTURING EXECUTION SYSTEMS (MES) IN CYBER PHYSICAL PRODUCTION SYSTEMS (CPPS)

[1,2]Xuan WU, [1]Virginie GOEPP

[1]INSA Strasbourg - ICube Laboratory
Strasbourg, France
xuan.wu@ensam.eu, virginie.goepp@insa-strasbourg.fr

[2]Ali SIADAT

[2]Arts et Metiers Institute of Technology, Université de Lorraine, LCFC, HESAM Université, Metz, France
ali.siadat@ensam.eu

ABSTRACT: *Cyber Physical Systems (CPSs) play a crucial role in the Industry 4.0 paradigm. The application of CPSs in production environments gave rise to the term Cyber Physical Production Systems (CPPSs). The emergence of CPPSs transforms the automation pyramid into a decentralized structure. Manufacturing Execution Systems (MES) are being highly influenced by this transformation. Currently, there remains a dispute on the role of MES in CPPSs, specifically with respect to the functions they support in CPPSs. This paper aims to shed light on the role of MES in CPPSs by analyzing the functional models of the two. Firstly, functional models of CPPSs and MES are proposed in the form of IDEF0 diagrams. Then, data flows between the functional models of CPPSs and MES are described and the functions of the two are compared. We find that MES will continue to play a significant role in CPPSs, but it will take new forms. The next-generation of MES requires greater flexibility, dynamism and improved functionality.*

KEYWORDS: *Cyber physical systems; Cyber physical production systems; Manufacturing execution systems; Functional modelling (IDEF0); 5C architecture; ANSI/ISA-95*

1 INTRODUCTION

In the era of Industry 4.0, Cyber Physical Systems (CPSs) play an essential role because they make the fusion of the physical and the virtual worlds (Kagermann et al., 2013). The application of CPSs in production environments leads to the development of Cyber Physical Production Systems (CPPSs). The first detailed description of a CPPS was given by Monostori et al. (2016), which has been widely cited and broadly accepted in recent years. As a complement to Monostori's description, Cardin (2019) added several missing points, including knowledge management, decision making and adaptability, and adapted it as following (the complementary part of Cardin's description has been highlighted in bold): "*CPPSs are **systems of systems** of autonomous and cooperative elements connecting with each other in situation dependent ways, on and across all levels of production, from processes through machines up to production and logistics networks, **enhancing decision-making processes in real-time, response to unforeseen conditions and evolution along time***".

Monostori et al. (2016) claimed that CPPSs partly break with the traditional automation pyramid. Traditionally, the Manufacturing Execution Systems (MES) was positioned as a middle layer to bridge the shop-floor with the Enterprise Resource Planning (ERP) system (left side of Figure 1). Today, the automation pyramid will be transformed into a more decentralized structure (right side of Figure 1). However, this transformation leads to vague on the role of MES in CPPSs: Does this decentralized structure of CPPSs make MES superfluous? If not, what is the role of MES in CPPSs? And how does MES need to change to fulfill this role? Some scholars attempted to answer these questions. For example, Rossit et al., (2018) claimed that current MES, which take care of scheduling and dispatching work orders, will be absorbed by CPPSs. This minimizes response times, increase the flexibility of the entire system, which is useful for decision making. However, Arica & Powell, (2017) and Mantravadi & Møller, (2019) outlined that with data collection, analysis, and communication functions across the value chains, MES should play a central role in Industry 4.0 manufacturing systems. ZVEI, (2017) working group also indicated that the significance of MES in Industry 4.0 will increase and not decrease. But the focus will shift away from simple execution management towards comprehensive coverage of all Manufacturing Operation Management (MOM) activities and away from the control of production towards optimization including the incorporation of events. Almada-Lobo, (2016) pointed out that MES is required to change to cope with the challenges created by Industry 4.0, especially considering the following four aspects: decentralization, vertical integration, connectivity and cloud computing and advanced analysis. We find that, in current academic research, there still remains a dispute on the role of MES in CPPSs, ranging from "no role because the hierarchical structure will be dissolved" and "fewer and fewer role because MES functions will be cannibalized by enhanced CPPSs and ERP functions" right up to "central role because MES will be the decision-making

center of an organization and create the optimal value chain". The existing studies are either based on literature reviews or empirical methods, but no one builds functional models to elaborate and compare the functions between CPPSs and MES. Therefore, this paper aims to shed light on the role of MES in CPPSs, by proposing functional models of CPPSs and MES in the form of IDEF0 diagrams and thus comparing their functions.

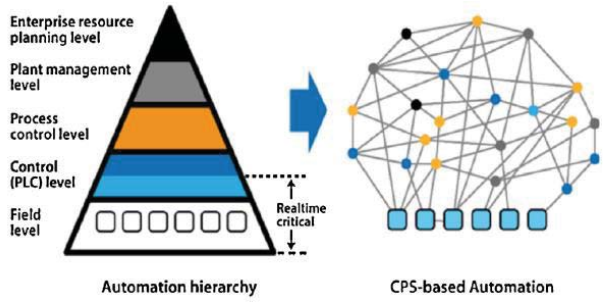


Figure 1: Decomposition of the automation hierarchy with distributed services (VDI/ VDE, 2013)

The rest of the paper is organized as follows. In Section 2, functional models of CPPSs and MES are proposed using IDEF0 diagrams. In Section 3, the data flows between the functional models of CPPSs and MES are described and then the functions of the two are compared. Section 4 concludes this paper and indicates future work.

2 FUNCTIONAL MODELS OF CPPS AND MES

IDEF0 (Integration DEFinition of function modelling) offers a functional modelling methodology for activity and information-flow analysis, focusing on the hierarchical decomposition of activities and the interaction flows between activities (IDEF0, 1993). In this section, using IDEF0 diagrams, the functional model of a CPPS based on the 5C architecture proposed in (Lee et al. 2015) and the functional model of an MES based on the ISA-95 standard (ISA-95 2005) are worked out.

2.1 Functional models of CPPSs

2.1.1 5C architecture

Lee et al. (2015) proposed a 5C architecture as a guideline for implementing CPSs. It defines the requirements and functions of what CPSs need to perform, through a sequential workflow manner. As shown in Figure 2, it consists of five levels: smart connection, data-to-information conversion, cyber, cognition and configuration levels. It can equally be extended to CPPSs. As the 5C architecture is a functional architecture, we propose to use it to build the functional model of a CPPS.

Level I (smart connection level) represents the physical space, where raw data are acquired from sensors and controllers and transferred to the network. At Level II (data-to-information level), raw data is processed to get meaningful data. Level III (Cyber level) is a central data hub, where each CPPS can interact with other CPPS to enrich its own data. Level IV (cognition level) generates a thorough insight of the whole system, which supports expert users to make decisions. At Level V (configuration level), CPPSs can self-configure and self-adapt to return to normal behaviors. For each level, we can extract a major activity, which is "acquire raw data from the physical space", "convert raw data to meaningful data", "build the cyber space", "make decisions", and "self-configure and self-adapt", respectively.

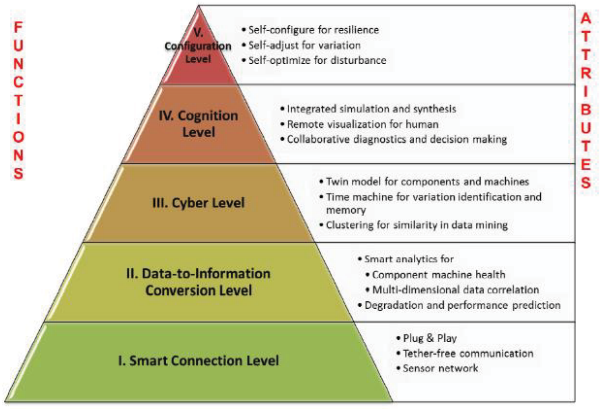


Figure 2: 5C architecture for the implementation of CPSs (Lee et al., 2015)

2.1.2 Functional model of CPPSs

According to the description of the 5C architecture, each level has a major activity. Therefore, the context diagram A0 "Implement a CPPS" can be decomposed into these five sub-activities, A1-A5, as shown in Figure 3, which shows the activities involved in the manufacturing process along with the information flows required to support these activities. A detailed description of the function modules and their relationship is given as follows.

A1—Acquire raw data from the physical space
This box describes the main activity in the Level I of the 5C architecture. The input is "operational commands", which is transformed into "raw data". The raw data refers to measurements data from plant instrumentation. The activity uses the mechanisms "data sources (such as sensors and controllers)", "communication protocols (such as MTConnect)" and "data acquisition methods", with the controls "production rules", "production capability" and "production routing".

A2—Convert raw data to meaningful data
This box describes the main activity in the Level II of the 5C architecture. The input that is linked to the prior output "raw data" of the activity A1 is transformed into "meaningful data". The meaningful data refers to the data at a higher semantic level, such as movement events of resources and statuses data of resources. Data analysis technologies as the mechanism are needed for getting meaningful data. In addition to having the same controls as the activity A1, another control is the data format.

A3—Build the cyber space
This box describes the main activity in the Level III of the 5C architecture. It has one input which is linked to the prior output "meaningful data" of the activity A2, one output "simulation data of status and behaviors of CPPSs", and the same controls as the activity A1. Simulation software and information systems are needed to support the activity and its function.

A4—Make decisions
This box describes the main activity in the Level IV of the 5C architecture. It has one input which is linked to the prior output "simulation data" of the activity A3, and one output "corrective and preventive decisions". Simulation software, information systems, proper presentation tools and expert users are needed to support the activity and this function. In addition to having the same controls as the activity A1, another control, the risk criterion, is needed to support the correct decisions to be taken.

A5—Self-configure and self-adapt
This box describes the main activity in the Level V of the 5C architecture. The input that is linked to the prior output "decisions" of the activity A5 is transformed into "adjusted production activities". It has the same controls as the activity A1. Physical entities in shop floor are needed to support the activity and its function.

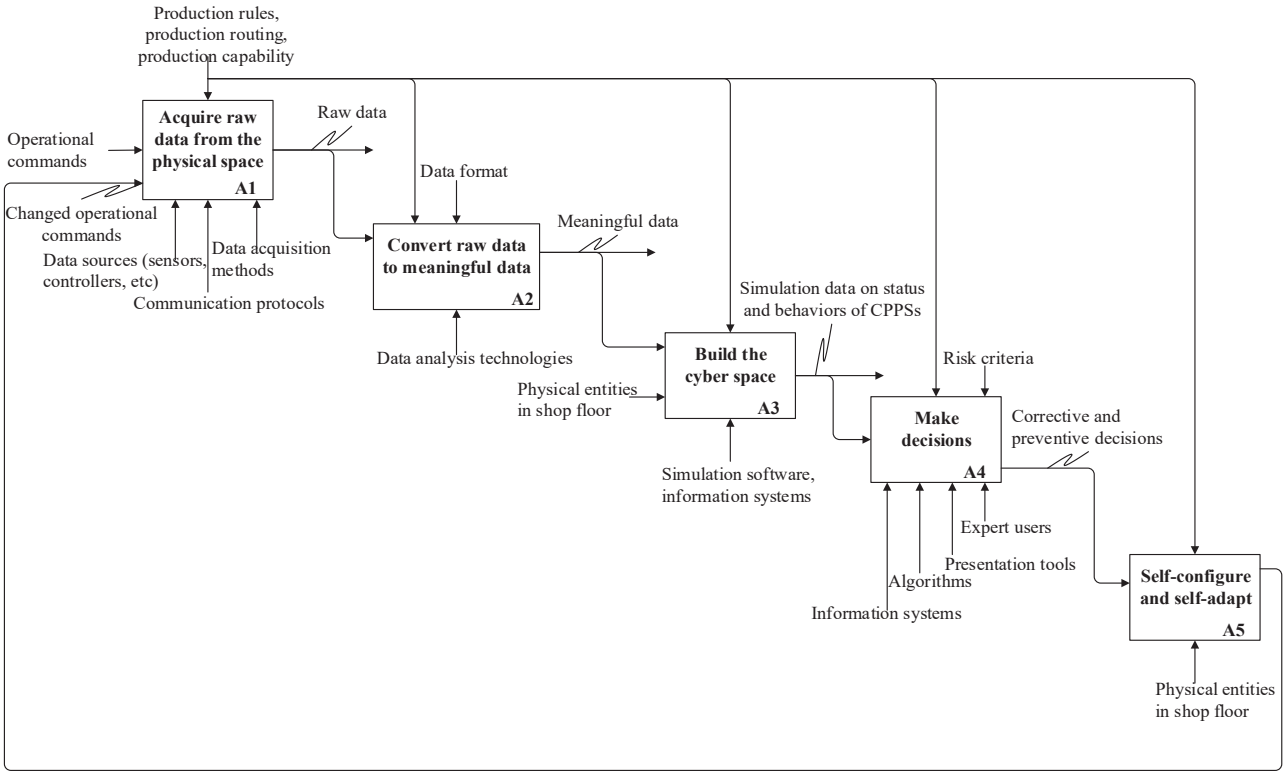


Figure 3: Activity A0 - Implement a CPPS.

2.2 Functional models of MES

2.2.1 ANSI/ISA-95 standard

The part 3 of the standard ISA-95 (2005) gives a detailed overview of all the activities and data flows of MOM in the area of production, inventory, maintenance and quality operational management. MOM could be regarded as the upper limited range of functions involved in MES applications. Generally speaking, the main focus of current MES applications is only on the production operations management. However, future MES functions will have to be developed towards MOM. Therefore, in this paper, MES refers to MOM, which covers all areas of operations management. One of the main advantages of ISA95 is the definition of the main functions and data flows within MOM. Therefore, for this study, MES function's classification is based on the ISA-95.

2.2.2 Functional model of MES

The ISA-95 described the generic activities in MOM, as shown in Figure 4. Each of the four areas of operations management (production, inventory, maintenance and quality) is composed of these eight activities. According to this, the context diagram B0 "Implement an MES" was decomposed into eight sub-activities, B1-B8, as depicted in Figure 5.

Activity B1 (*Manage definitions of work*) manages the work information and develop work rules. Activity B2 (*Manage resource*) manages the information about the resources including machines, tools, labor, materials and

energy. Activity B3 (*Detailed schedule*) makes the schedule and determines the optimal use of resources to meet the schedule requirements. Activity B4 (*Dispatch work*) dispatches work lists to equipment and personnel. Activity B5 (*Manage executions of work*) directs the performance of work, as specified by the dispatch list. Activity B6 (*Track work*) summarizes and reports information about the personnel and equipment used, the material consumed, material produced and other relevant data such as costs and performance analysis results. Activity B7 (*Collect data*) gathers, compiles and manages data for specific work processes. Activity B8 (*Analyze performance*) analyzes and reports performance information of production systems.

The data flows between these activities are extracted from part 3 of the ISA-95. For example, one of the tasks in product definition management, a subset of "B1-manage definitions of work", is extracted from the ISA-95: providing product production rules to personnel or other activities. From this task, we can conclude that the production rule is the output of B1. Like this, the data flows between these activities can be found in the ISA-95, so we will not discuss them here.

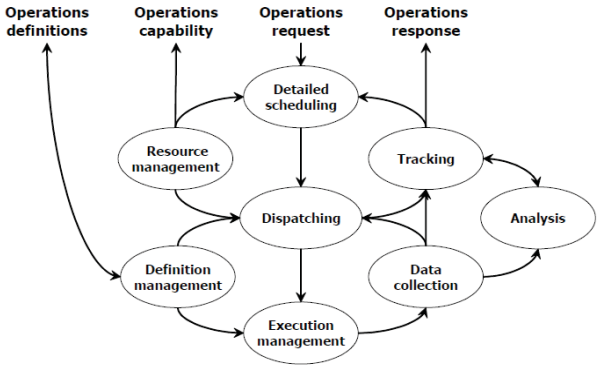


Figure 4: Generic activity model of manufacturing operations management (ISA-95, 2005)

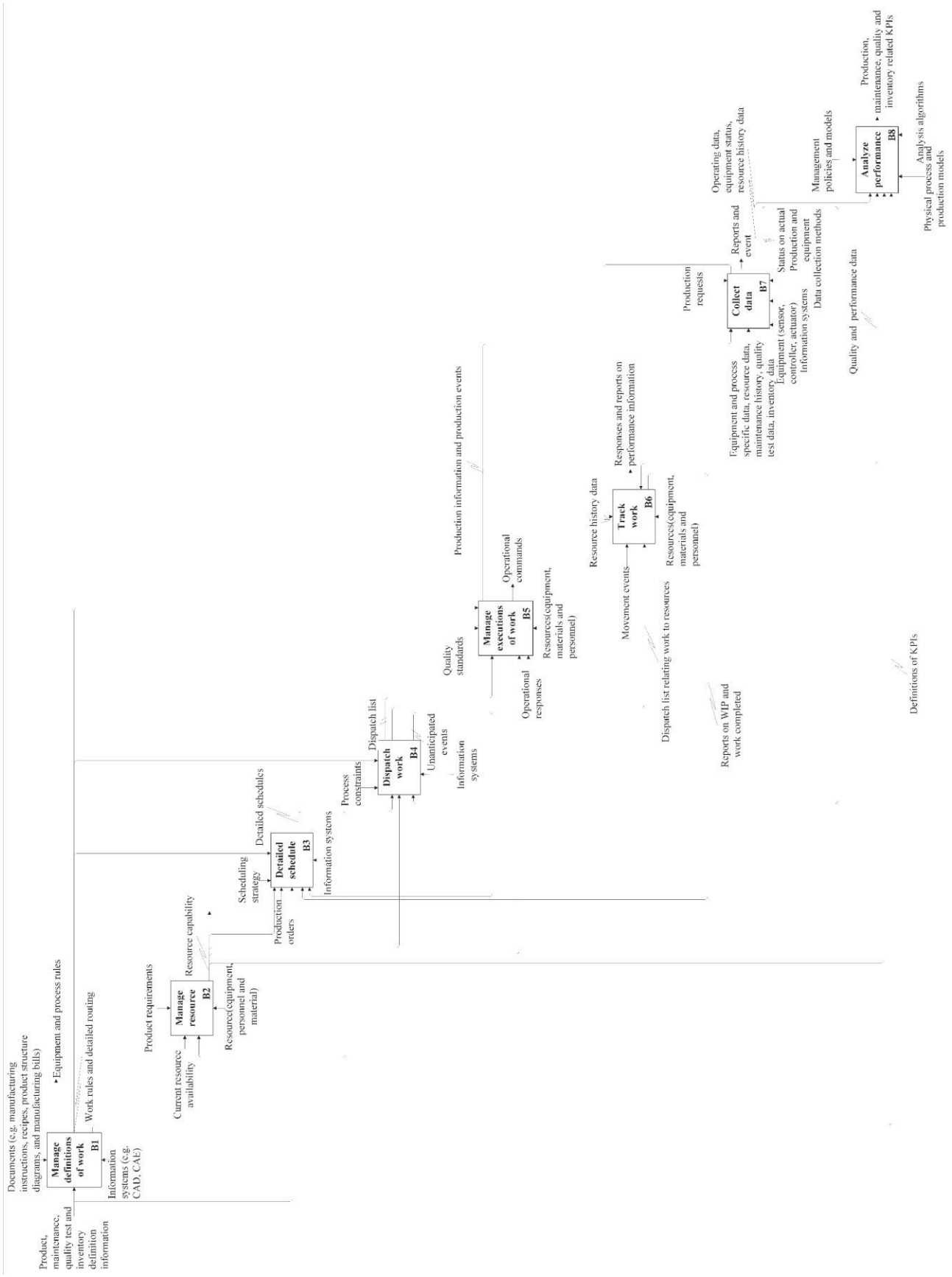


Figure 5: Activity B0 – Implement an MES

3 FUNCTION ANALYSIS OF MES IN CPPS

Based on the established functional model of CPPSs and MES, this section describes the data flows between CPPSs and MES, which represents the functional interfaces between them. Then based on the data flow, this section analyses which functions of MES are redundant in CPPSs and which functions are central.

There are two-way data flows in MES. On the one hand, MES deals with the top-down data flow: the requirements provided by the organizational level must be transformed into detailed operational commands to the production areas. On the other hand, it manages the bottom-up data flow. MES collects shop floor data, analyzes it, and extracts useful information to provide key performance indicators (KPIs) to the company for making commercial decisions and improving production performance. Therefore, the data flows between CPPSs and MES are described as follows.

- *Data flow 1:* "*equipment and process rules" from the output of the Activity B1 → mechanisms of the Activity A1 to A5.*

Equipment and process rules define the specific production/inventory/maintenance/quality test instructions that are executed in the shop floor based on the specific assigned tasks, such as programs for CNC machines.

- *Data flow 2: "operational commands" from the output of the Activity B5 → the input of the Activity A1.*

Operational commands define the commands to start or complete elements of a work order in the shop floor, such as procedures for setting up machines or maintenance of machines.

- *Data flow 3: "operational responses" from the output of Activity A3 → the input of the Activity B5.*

Operational responses define information received from the shop floor in response to commands, such as the completion or status of elements of work orders.

- *Data flow 4: "equipment and process specific data, resource data, maintenance history, quality test data, inventory data " from the output of Activity A3 → the input of the Activity B7.*

Equipment and process specific data defines the data about the process being performed and the resources involved.

- *Data flow 5: "Production, maintenance, quality and inventory related KPIs" from the output of Activity B8 → the input of Activity A4*

The manufacturing operations management areas have different sets of performance indicators, which are used together to make decisions and to monitor the realization of enterprise business objectives.

- *Data flow 6: "current resource availability" from the output of Activity A3 → the input of Activity B2.*

Resources include machines, tools, labor (with specific skill sets), materials, and energy.

- *Data flow 7: "resource capability" from the output of Activity B2 → the input of A3*

Resource capability defines the committed available, or unattainable of resources. The information is based on the current statuses and future needs (as identified in Activity B3).

- *Data flow 8: "production and movement events" from the output of Activity A3 → the input of the Activity B6.*

Production and movement events include the movements of the path of materials and updates to lot locations.

For the data flow 1, 3, 4, 6, 7 and 8, MES mainly serves as an information platform that contains all information in the production, inventory, maintenance and quality test operations management and we find that the functions of MES are very similar to those of digital twin in terms of work definitions management, resource management, work track and data collection. For example, in terms of the MES's function "data collection", digital twins store all data from the field and other information systems in real-time, as in the MES. Digital twin refers to the virtualization of the physical resources in the cyber world and its main purpose is to facilitate the decision-making process through real-time simulation (Tao et al., 2018). Therefore, future MES can be used as a digital twin due to its ability to provide digital images and monitor manufacturing processes in real-time.

For the data flow 5, MES analyzes and reports performance information to expert users for decision-making. In the Industry 4.0 context, the function of performance analysis in MES becomes more complex and important. With the development of information and communication technology (ICT), the amount of data collected from the shop floor increases tremendously. MES should always be required to present the most relevant data to the humans for decision making.

For the data flow 2, MES sends the operational commands to the physical space of CPPSs. The function of executions management is equally important because it is not only necessary to have data coming from the shop floor to MES, but also to be able to act from the MES to the shop floor, by offering operational commands on the production control system. In the CPPSs context, it should be possible in the future to decentralize operational decisions and delegate a part of decisions made previously in MES to lower levels of production systems, such as smart machines and smart products. This reduces the number of tasks of this function in terms of the operational level decisions. Since MES covers all the areas of MOM, it can collect all data related to production, quality, inventory and maintenance. This endows MES with the holistic insights for the manufacturing processes and, which can make commands before any disruptions.

4 CONCLUSION AND FUTURE WORK

The paper studies the role of MES in CPPSs by analyzing the functional models of CPPSs and MES. MES's functions are still required for CPPSs, but they need to

be presented in new and different forms, with some being incorporated into the CPPSs' functions, some expanding their horizons and some decentralizing to the local intelligent entities. For example, the MES's function "detailed schedule" will only have high level tasks, making rough planning of manufacturing orders, while flexible planning of partial orders will be made by local entities of CPPSs through taking into account local resource availabilities in real-time. Correspondingly, MES software will move from monolithic software systems towards functional modules that will be implemented in a highly distributed way. Therefore, the next-generation MES requires greater flexibility, dynamism and improved functionality than today's MES.

In the future work, validation in a real platform will be worked out to evaluate the quality of the proposed model. Besides, we will implement a "dynamic link" between CPPSs and MES from a functional perspective. In our view, the functional level is the best suited for this implementation as it enables to free of the underlying technical solutions. Indeed, the MES and CPPS interrelated functions cannot be engineered independently and then simply combined together. The idea is rather to coordinate the design of both systems to explore hidden functions and ensure that their interactions are mutually supportive. This "dynamic link" is twofold: one the one hand, if the configuration of CPPSs (e.g. the layout of CPPSs) changes, the organization and business processes will be changed automatically. One the other hand, if new functionalities of EISs are needed, CPPSs can configure themselves automatically to meet these new requirements. The digital twin could be a solution to implement such dynamic link as the change of state of the physical object will have impacts on the state of the cyber object automatically and vice versa in digital twins. Cimino et al., (2019) pointed out the future possibility of integrating the digital twin of the field devices with the MES in order that decision making could be made in a fully reactive way through the digital twin to the MES.

ACKNOWLEDGMENTS

The paper of the first author is financially supported by China Scholarship Council under Grant 201706020154.

REFERENCES

Almada-Lobo, F. (2016). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). Journal of Innovation Management, 3(4), 16–21. https://doi.org/10.24840/2183-0606_003.004_0003

Arica, E., & Powell, D. J. (2017). Status and future of manufacturing execution systems. 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2000–2004. https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8290242

Cardin, O. (2019). Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework. Computers in Industry, 104, 11–21. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.10.002

Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, *113*, 103130. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130

IDEF0. (1993). *Integration Definition for Function Modelling*. https://www.idef.com/idefo-function_modeling_method/

ISA-95. (2005). *ANSI/ISA-95. 00. 03-2005 (ISO/IEC 62264-3) Enterprise-Control System Integration-Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management*. https://www.isa.org/isa95/

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0. *Final Report of the Industrie*, *4*(0).

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, *3*, 18–23. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001

Mantravadi, S., & Møller, C. (2019). An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0? *Procedia Manufacturing*, *30*, 588–595. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.083

Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, *65*(2), 621–641. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005

Rossit, D. A., Tohmé, F., & Frutos, M. (2018). Industry 4.0: Smart Scheduling. International Journal of Production Research, 1–12. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504248

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(9), 3563–3576. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1

VDI/ VDE. (2013). Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Gesellschaft Mess Und Automatisierungstechnik (GMA), Thesen und Handlungsfelder.

ZVEI. (2017). Industrie 4.0: MES - Prerequisite for digital operation and production management. https://www.zvei.org/en/press-media/publications/industrie-40-mes-prerequisite-for-digital-operation-and-production-management/

STUDY OF SYMBIOTIC FLOWS WITHECONOMIC APPROACH

MayssaCHEBBI[1.2], Daniel ROY[1], Sophie HENNEQUIN[1]
[1]Université de Lorraine-LGIPM, 1 route d'Ars Laquenexy, F-57078 Metz Cedex 03 France
{mayssa.chebbi ;daniel.roy ;sophie.hennequin}@univ-lorraine.fr
[2] Ecole Pluridisciplinaire Internationale, Route de ceinture, Sahloul, Sousse 4021, Tunisie

Nahla CHABBAH SEKMA
University of Tunis El Manar, National Engineering School of Tunis, UR-OASIS-ENIT, 1002 Tunis, Tunisia

ABSTRACT:
At the present, there is a need to give further importance to circular economy and its resulting methods such as the industrial symbiosis (IS), to reduce dependency on raw materials, and to encourage optimal resource use and recycling. That is the reason why, in this paper, we propose an approach to highlight the establishment of an IS in the East of France. We identify potential flows and we study the potential gains obtained under different strategies by participating in the symbiosis. We propose a mathematical model in order to identify for firms involved the interest of the participation in the IS given different costs and earnings, considering economic, societal and environmental impacts. The proposed model is based on an economic approach etc.

KEYWORDS: *Systems modeling, circular economy, industrial symbiosis, economic approach, materials flow.*

1 INTRODUCTION

Sustainability is an elementary issue of natural ecosystems. A highly sustainable ecosystem should be well structured in resource utilization and ecological compatibility (Odum, 1996). As an important component of sustainable engineering, industrial ecology has drawn great attention (Sikdar, 2003). Industrial ecology (IE) is the study of the effect of industrial development, technology, applications, and the associated changes in society and economy on the environment. Industrial symbiosis (IS) is a sub-field of the IE, a discipline emerged more than twenty years ago that studies the flows of materials and energy in industrial and consumer activities as well as their environmental effects. Moreover, it studies the influences of economic, political, regulatory and social factors on these flows (Chertow, 2000).

There is a need to give further importance, to reduce dependency on raw materials, and to encourage optimal resource use and recycling. Industrial symbiosis (IS) has been considered as one of the effective solutions to reduce the impact of waste emissions and primary input consumption moving towards sustainable production models. In fact, IS can be approached from various perspectives (e.g. social, economic, environmental, spatial, organizational, and technical) where case studies (such as eco-industrial parks) are mostly dominating (Boons and Baas, 2006).

In this paper, we describe a part of collaboration with ADEME1which aims implementing a symbiotic project in an industrial area in the east of France (ADEME). The main objective of the project is to design a decision-support tool to facilitate the implementation and management over time of symbiotic flows within this industrial zone. Indeed, for the industrial symbiosis to last, the investment (and its sustainability over time) of each of the stakeholders (companies, government, etc.) is essential. Even if the reasons for this investment over time are diverse, the economic dimension remains a key success factor. That's why, in this paper, we propose an economic approach in order to identify the economic factors allowing for a strong involvement of stakeholders and we focus here on companies (even if the government is considered through fines and subsidies). The proposed mathematical model based on an economic approach is only a small part of the decision support tool that will be defined. As a partnership with stakeholders, this project is carried out within the framework of promoting a circular economic model where nothing is lost, all is transformed.

The paper is structured as follows. In section 2, we highlight the main interests of industrial symbiosis. In section 3, we describe the identification of the symbiotic flows for the considered industrial area. In section 4, we propose a mathematical model based on an economic approach applied to our industrial problem. In section 5, we address a simulation of our proposed model applied on the case of two factories. Finally, we end with a conclusion and perspectives in section 6.

[1] ADEME: is a public establishment under the supervision of the Ministry of Ecological Solidarity Transition and the Ministry of Higher Education, Research and Innovation.

2 INDUSTRIAL SYMBIOSIS

The industrial symbiosis (IS) principles expect that turning waste output from one facility into raw material for another facility will lead to environmental benefits caused by a reduced intake of virgin material and/or reduced emissions (Chertow, 2000).

The economic aspects of the exchange relationships are estimated and discussed as a combination of investments at the time of initiation, and direct and/or indirect economic savings related to upstream or downstream production associated issues. The direct economic savings are usually resulting from avoided discharge fees or disposal costs and from reduced prices achieved by substitution. The indirect economic benefits are related to avoided investments, increased flexibility or supply security. Thus the economic aspects of the IS projects are estimated and discussed as a combination of direct cost reductions. The most important investment is the treatment cost, which gives us multiple investment scenarios and estimated payback times corresponding to the different costs incurred at the project creation time.

An IS approach has several benefits for a company. In the following, we present the relationship between these benefits and their impacts on costs and earnings of a business. A company that adopts industrial ecology practices (such as symbiosis) may have:

- Reduced raw material costs. It is obvious that the costs of extracting raw materials are increasing, hence the increase in purchase prices. The symbiosis proposes a strategy of substitution of these raw materials by others derived from wastes of other companies. In most cases, these wastes are less expensive than the raw materials. The IS promotes sustainable management of raw materials. It allows the company to reduce the quantities of materials used and replace one raw material by another, more sustainable. If well done, this management sometimes allows the company to realize considerable financial gains (Meadows *et al.*, 2004).
- Reduction in management costs for residual materials/savings in disposal costs: Participation in the IS allows companies to sell their industrial scraps (waste, co-products) rather than pay the costs of treatment and disposal of waste, thus achieving a large economic benefit. Indeed the recovery of waste makes it possible to provide reduced prices, which are difficult to obtain in the raw state. This recovery, therefore, has a high added value (Hoornweg*et al.*, 2013).
- Pooling of transport, storage and infrastructure: The IS promotes the pooling of resources. We consider the pooling of transport, treatment or packaging that occurs before reuse of waste by another company, or the pooling of supplies of raw materials and manufactured products. This cooperation also makes it possible to minimize environmental impacts and economic costs.
- Processes number optimization: Waste treatment and disposal methods or extraction of raw materials require a well-defined set of processes, for example the unloading, immersion and burial of waste. Symbiosis can avoid certain processes, thereby minimizing waste treatment costs.
- Improved brand image: The IS favors green marketing which consists in using an ecological approach to improve its brand image. The latter is a crucial point for any business. Being a green business can directly influence the sales number. In fact, when the products and the brand have a positive image, they are more easily marketable and attractive, hence increasing the number of new customers (improving reputation and increasing competitiveness).
- Energy saving: Most of all industrial energy consumption is linked to the extraction or production of basic materials, while only about a quarter is used in processing from raw materials to finished products. On the one hand, the IS reduces the extraction of raw materials. On the other hand, the more the industrial system produces from virgin materials, the more it consumes energy. Alternatively, using residual materials as inputs would save energy by avoiding extraction and transformation operations, which leads to the minimization of the energy used.
- Creation of new employment opportunities: One company's waste may become another's raw material. This exchange can be either direct or through an intermediary, which requires the creation of new job opportunities and sometimes of new business resulting in the reduction of unemployment rate and the improvement of social brand image (Morgan and Mitchell, 2015).
- Reduction of the environmental costs: The symbiosis contributes to the reduction of pollution related to waste and to its landfill since the waste of a company will be recovered and not thrown away. This allows the company to decrease the carbon tax rate as well as increase the financial aid received from the government (Le Moigne, 2014).

We present in this part the hurdles and difficulties generally encountered which can slow down the symbiosis.

- A company can have a resistance to change since changing habits can be a real challenge. The changes in waste management, the introduction of new professional figures, etc. can therefore be a source of anxiety. This can create a brake on

real and concrete applications of industrial symbiosis.

- The company must deal with the complexity and number of products flows to be exchanged in the symbiosis, the degradation of the material and the impurity of the by-products used in the symbiotic process. The physical characteristics of recoverable flows can make it impossible to establish a synergy (Adoue, 2007). The conception of certain materials does not allow them to be reused and they are practically impossible to recover, since the separation of their components poses several difficulties and represents significant costs for the company.
- In addition, certain information related to these flows of products or energy exchanged may be critical for a company (confidentiality problem related for example to particular processes used generating waste that may integrate a symbiosis, etc.).
- Achieving synergy between companies depends essentially on their economic interest. The decision to implement a symbiotic flow is based on the relation between benefit and cost. The flow of waste potentially reusable by the companies participating in the symbiosis is also considered as a limit, since it generates additional costs: when the transformation of waste into raw materials requires significant investments (Geldron, 2011).

In what follows, we describe one of the types of symbiotic flow identified

3 IDENTIFICATION OF POTENTIAL SYMBIOTIC FLOWS

In this paper, we consider an industrial zone. This industrial zone is a logistics platform with two industrial activity areas. It is recognized as the most important logistics park in east of France. To date, nearly 120 companies are located there, not only in the sectors of transport and logistics, but also in industrial production and trading, totaling nearly 8,000 salaried jobs. This site is particularly attractive for implementing a symbiotic project. Among the types of flows found, we can cite: wood, aggregates, metals (ferrous metals, non-ferrous metals), plastics (thermoplastics, thermosets), paper, cardboard, edible oils and fats, water, steam and sludge.

In parallel, with the search for flows, we identify the list of companies, existing in this industrial zone. In order to identify the material and energy flows that can be exchanged between these several companies, we grouped them by their activity sectors. Then, based on the collected information, we did a general analysis of each activity sector identified, in order to find its possible INPUT and OUTPUT. Figure1 shows a general overview of the potential exchanges between activity sectors of the considered industrial zone.

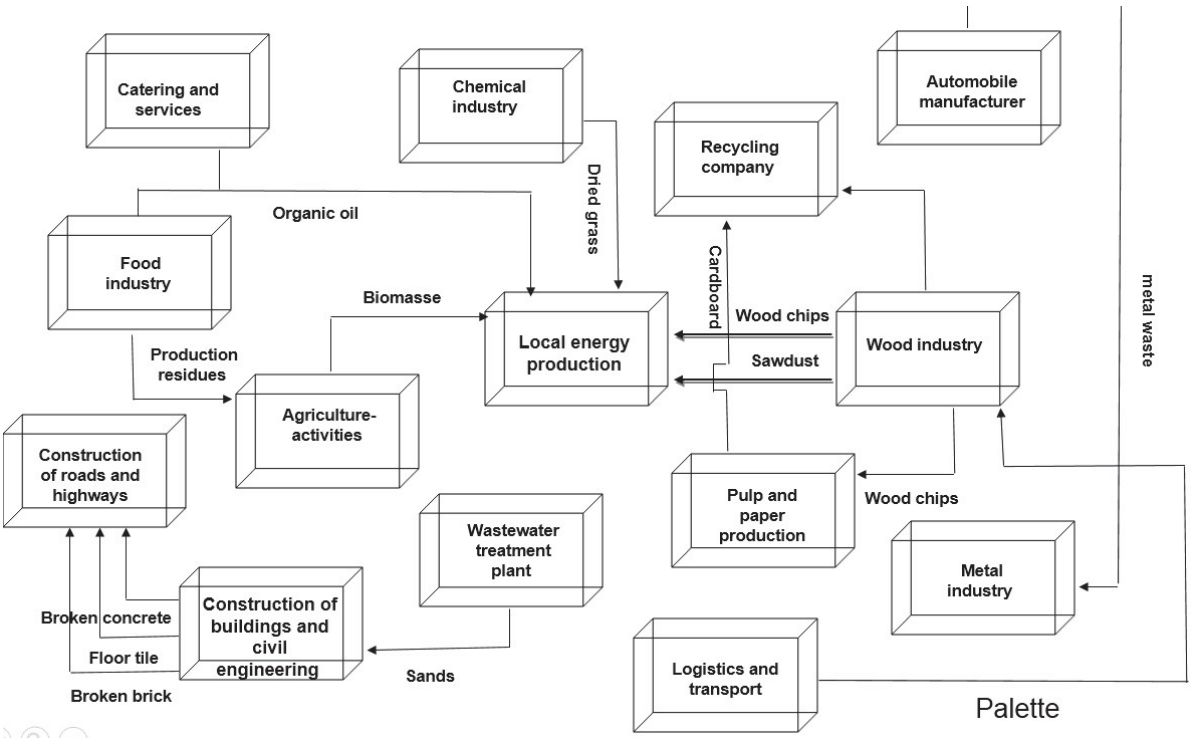


Figure 1: potential exchanges between activity sectors

In this paper, we chose to identify synergies between companies by defining sector of activities. In fact, in similar works, the authors generally adopt an approach based on life cycle analysis (Daddy et al, 2017) (Zang et al, 2017).Although this approach is exhaustive and precise, it requires a lot of details and a huge amount of data. Since we consider an industrial zone with a limited number of companies as well as a sector of activity essentially oriented around logistics (even if it is not the only industrial sector established), our idea in a first step is the classification by sector. By following this methodology, the exchanges with companies become easier and more understandable which will facilitate discussion and companies' engagement around the implementation of the symbiosis.

The concretization of the symbiotic flows is our main objective. Based on the characteristics of this industrial zone, we try to choose the flows having the cheapest costs. This region constitutes a logistics platform, hence the wide use of pallets and cardboard. Moreover, it contains a unit of energy production through the combustion of biomass, which generally comes from wood residues as well as from wood industries. According to all these indicated flows, we design in the figure 2, an alternative circular organization including flows very specific to this industrial zone.

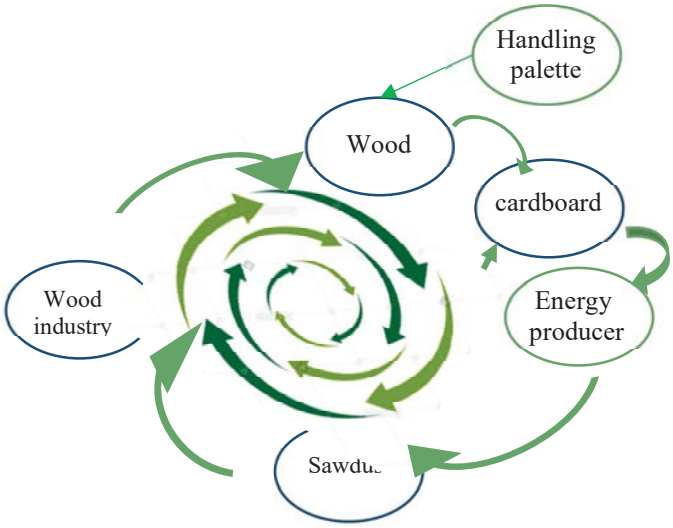


Figure 2: cyclic flows

The establishment of a symbiotic flow changes the organization and logistics of the economic activities concerned. This can generate additional costs but also generate benefits due to the saving of a resource and its substitution and/or pooling. To interest an economic actor, an industrial symbiosis must represent financial added value and must enable this actor to reduce the production costs of a product (Nouinou et al, 2019) (Hennequin et al, 2019). The objective is to promote projects generating a double environmental and socio-economic gain. It is then possible to talk about a win-win solution for the environment (the location and its environmental and social characteristics) and the economy (Dong et al, 2013). the model proposed in the following section allows the evaluation of the economic feasibility which consists in the quantification of the costs and the gains relative to the establishment of a synergy by means of a cost / benefit analysis.

In the next section, we propose a mathematical model studying the interest of each of the companies that participate in the symbiosis, with an economic approach.

It was almost impossible to collect data from companies in the field due to the Covid 19 virus, for this reason the mathematical model presented in this section is only a first version which will be improved after the concrete visits.

4 MATHEMATICAL MODEL

It has to be noted that it was almost impossible to collect data from companies in the field due to the covid-19 virus, for this reason the mathematical model presented in this section is only a first version which will be improved after concrete visits and the complete data collection.

The industrial system considered is represented by a set of *N* factories, which are located in the same industrial zone. Factories will be denoted by *i*, with $i \in \{1 \dots N\}$. For each of these factories, we have different physical flows of materials and energy, which can be inflows such as raw materials, energy and water (inputs), or outflows, such as heat and water (outputs).Different types of inputs and outputs could be defined such as wood, cardboard, metals, etc., they will be denoted *k*, with $k \in \{1 \dots K\}$.

We suppose that we have environmental and social costs, which could correspond for example to cost related to carbon or pollutions emissions and cost related to accidents at work, working conditions, etc.

The costs of transport, environmental, social and storage of an INPUT (respectively OUTPUT) *k* for the factory *i* inside the IS are given by:
$\boldsymbol{C^k_{trsp,si,input,j}(i)}, \boldsymbol{C^k_{env,si,input,j}(i)}, \boldsymbol{C^k_{soc,si,input,j}(i)}$ $\boldsymbol{and C^k_{stor,si,input,j}}$(i)
(Respectively
$\boldsymbol{C^k_{trsp,si,output,i,j}(i)}, \boldsymbol{C^k_{env,si,output,i,j}(i)}, \boldsymbol{C^k_{soc,si,output,i,j}(i)}$ $\boldsymbol{and C^k_{stor,si,output,i,j}}$*(i)).*

The environmental cost of an INPUT (respectively OUTPUT) *k* imported (respectively exported) out of the IS by the factory *i* is $\boldsymbol{C^k_{trsp,ext,input}(i)}$ (respectively $\boldsymbol{C^k_{trsp,ext,output}(i)}$).The social cost of an INPUT (respectively OUTPUT) *k* imported (respectively exported) out of the IS by the factory i is $\boldsymbol{C^k_{soc,ext,input}(i)}$ (respectively $\boldsymbol{C^k_{soc,ext,output}(i)}$) and the storage cost of an INPUT (respectively OUTPUT) *k* imported (respectively exported) out of the IS by the factory *i* is $\boldsymbol{C^k_{stor,ext,input}(i)}$ (respectively $\boldsymbol{C^k_{stor,ext,output}(i)}$).

The cost of an INPUT *k*, imported from outside the IS by the factory *i,* is given by $\boldsymbol{C^k_{ext,input}(i)}$, and the cost of

INPUT *k*, transferred from factory *j* to factory *i* is given by $C^k_{si,input,j}(i)$.

We suppose that the INPUTs imported from outside the IS are assumed to be ready for use and do not require prior processing (there is no cost of treatment). The cost of processing an OUTPUT (respectively INPUT) *k* exported from the IS by the factory *i* is $C^k_{treat,si,output,i,j}(i)$ (respectively $C^k_{treat,si,input}(i)$).

We suppose that the factory *I* can apply a kind of internal symbiosis such that it recovers its own waste then reuses them as input. The treatment, handling and environmental costs of a flow *k* transferred in the internal symbiosis of the factory *i* are denoted, respectively, by $C^k_{treat;int}(i)$, $C^k_{manut;int}(i)$,and$C^k_{env,int}(i)$.The gain obtained from internal symbiosis related to the flow k for the factory *i* is denoted by G^k_{int}., as shown in the figure 3.

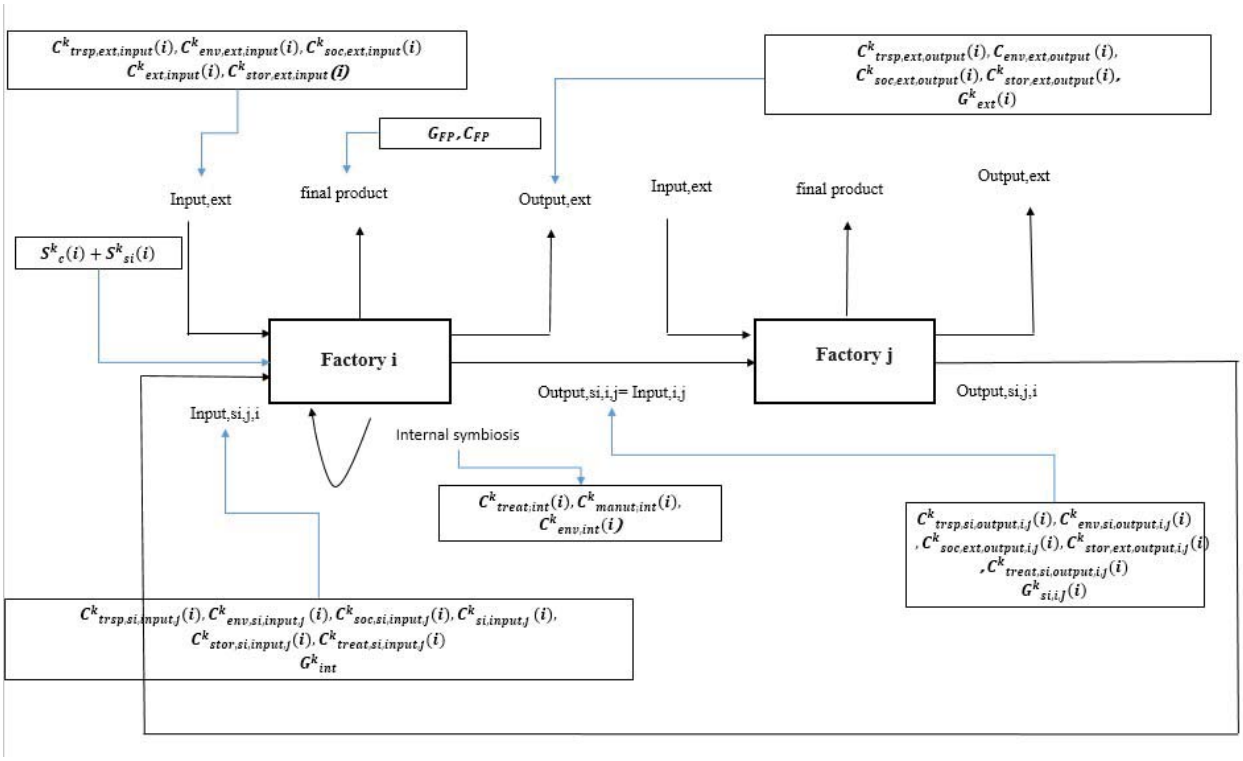


Figure 3: Flow exchanges between factories *i* and *j*

The economic profit of a factory *i* is denoted by ***P(i).*** The Total gain realized by the factory *i* is denoted by ***G(i)***. It is given by the sum of G^k_{int},, the sales turnover of outputs outside and inside the IS denoted respectively by $G^k_{ext}(i)$and $G^k_{si,i,j}(i)$,the earnings from sales of finished products G_{PF} and the financial aids given by government either when the factory *i* participates in the symbiosis $S^k_{si}(i)$ or not participates $S^k_c(i)$.

The total cost to be paid by the factory i is defined by ***D(i)*** given by equation (3).It is the sum of the total costs to be paid for INPUTs and OUTPUTs denoted respectively by $D_{input}$and D_{output}, the total cost of internal symbiosis $D_{int}$and the cost of finished products C_{PF}.

The economic profit of a firm participating in the IS is described using equation (1). As noted, it is the difference between the total gain and the total cost of a factory *i*.

$$P(i) = G(i) - D(i) \quad (1)$$

Such as,

$$G(i) = \sum_{k=1}^{K}[G^k_{ext}(i) + \sum_{\substack{J=1 \\ j\neq i}}^{N} G^k_{si,i}(j) + G_{PF}(i) + G^K_{int}(i) + S^k_c(i) + S^k_{si}(i)]. \quad (2)$$

Equation (2) describes the total gains made by a company when it participates in the symbiosis.

$$D = D_{input} + D_{output} + D_{int} + C_{PF}. \quad (3)$$

Equation (3) represents the total costs made by a company when it participates in the symbiosis.

$$D_{input}(i) = \sum_{k=1}^{K}[C^k_{trsp,ext,input}(i) + C^k_{env,ext,input}(i) + C^k_{soc,ext,input}(i) + C^k_{ext,input}(i) + C^k_{stock,ext,input}(i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N}[C^k_{trsp,si,input,j}(i) + C^k_{env,si,input,j}(i) + C^k_{soc,si,input,j}(i) + C^k_{si,input,j}(i) + C^k_{stock,si,input,j}(i)) + C^k_{treat,si,input}(i)]. \quad (4)$$

We give in equation (4) the sum of the costs, incurred by the company, of the inflows coming either from outside or inside the symbiosis.

$$\boldsymbol{D_{output}(i) = \sum_{k=1}^{K}[C^{k}_{trsp,ext,output}(i) + C^{k}_{env,ext,output}(i) + C^{k}_{soc,ext,output}(i) + C^{k}_{stor,ext,output}(i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N}(C^{k}_{trsp,si,output,i,j}(i) + C^{k}_{env,si,output,i,j}(i) + C^{k}_{soc,si,output,i,j}(i) + C^{k}_{stor,si,output,i,j}(i) + C^{k}_{treat,si,output,i,j}(i))]} \quad \textbf{(5)}$$

Equation (5) presents the sum of the costs, incurred by the company, of the outflows coming either from outside ***or inside the symbiosis.***

$$\boldsymbol{D_{int}(i) = C^{k}_{treat;int}(i) + C^{k}_{manut;int}(i) + C^{k}_{env,int}(i)} \quad \textbf{(6)}$$

If there are internal symbiotic flows, the sum of the costs of these flows is denoted by $\boldsymbol{D_{int}(i)}$and is given by equation (6)

The mathematical model is proposed to encourage the concept of IS and especially, to recover waste while ensuring economic gain. The objective of the model is to study the interest that a company participates in an IS. This model is based on the different impacts of the participation in the symbiosis.

In the next section we are going to apply our model in a numerical experiment where we use generic values to acquire new knowledge about our model, and study its behavior.

5 NUMERICAL EXPERIEMENT

In this section, we conduct an experiment drawing inspiration from the considered industrial zone located in east of France. We consider a single flow (*k = 1*), "the wood" which will be exchanged between two factories *i* and *j (N=2)*.
In a general way, participation in a symbiosis generates many changes in costs and earnings for each company.
The symbiosis allows the improvement of the brand image of a company, which allows it to increase its market share as well as its gains of finished product. Table 1 show the impact of symbiosis on the $\boldsymbol{G_{PF}}$ value for the factory *i* going from 600000 to 750000 monetary units.
The IS generates a reduction in green house gas emission and then a reduction in the environmental cost. Industrial symbiosis promotes geographic rapprochement and resources pooling. The latter are relevant solutions for controlling transport costs and minimizing the environmental footprint of actors on the supply chain. It could also create new employment opportunities. Environmental, handling and treatment costs of the internal symbiosis are assumed to be zero. The costs and earnings of each company participating in the IS will vary. These variations are presented in tables 1and 4respectively for factory *i* and *j*.

Table 1: Data associated with the Factory i

Costs/gains	Symbol	Value before symbiosis (i)	Value after symbiosis (i)
Gain finished product	$\boldsymbol{G_{PF}}$	6000000	750000
sales turnover(outside SI)	$\boldsymbol{G_{ext}}$	10000	10000
Classic subsidies	$\boldsymbol{S_c}$	100000	100000
cost of transport	$\boldsymbol{C_{trsp,ext,input}}$	70	60
	$\boldsymbol{C_{trsp,ext,output}}$	80	40
Environmental cost	$\boldsymbol{C_{env,ext,input}}$	3	1
	$\boldsymbol{C_{env,ext,output}}$	3.2	3.2
Social cost	$\boldsymbol{C_{soc,ext,input}}$	1.8	0.6
	$\boldsymbol{C_{soc,ext,output}}$	2	0.8
Storage cost	$\boldsymbol{C_{stor,ext,input}}$	20	18
Cost of external inputs	$\boldsymbol{C_{ext,input}}$	40000	19000
Cost of finished product	$\boldsymbol{C_{PF}}$	660000	570000
Total gain	$\boldsymbol{G}$	710000	1090600
Total cost	$\boldsymbol{D}$	664180	598664,63
Profit	$\boldsymbol{P}$	45820	491935,38

By participating in symbiosis other new parameters appear such as gains from internal symbiosis ($\boldsymbol{G_{int}}$) . In fact by participating in the internal symbiosis, a company recovers its own waste and reuses it as inputs for itself, which generates new gains. Also companies can benefit from subsidies and financial aid from the government. This value, noted $\boldsymbol{S_{Si}}$, is given in the following table by 20000 monetary units for the factory *i*, all the new parameters are listed in tables 2 and 4 respectively for factory *i* and *j*.

Table 2: The values of the parameters added by the symbiosis for factory i

Costs/gains	gains/ costs	values /UM
sales turnover(inside SI)	$\boldsymbol{G_{si,i}}$	30400

Internal symbiosis gain	G_{int}	200
Symbiosis subsidies	S_{Si}	20000
cost of transport	$C_{trsp,si,input}$	1,2
	$C_{trsp,si,ouput}$	29
Environmental cost	$C_{env,si,output}$	0,55
	$C_{env,si,input}$	0,5
Social cost	$C_{soc,si,output}$	0,325
	$C_{soc,si,input}$	0,3
Storage cost	$C_{stor,si,input}$	11,75
Cost of external inputs	$C_{si,input}$	9500

Table 3: Data associated with the Factory j

Costs/gains	Symbol	Value before symbiosis	Value after symbiosis
Gain finished product	G_{PF}	700000	856000
sales turnover	G_{ext}	7000	3600
Classic subsidies	S_c	90000	90000
cost of transport	$C_{trsp,ext,input}$	80	45
	$C_{trsp,ext,output}$	90	34
Environmental cost	$C_{env,ext,input}$	4	1
	$C_{env,ext,output}$	3.5	0.9
Social cost	$C_{soc,ext,input}$	3	0.9
	$C_{soc,ext,output}$	2	0.7
Storage cost	$C_{stor,ext,input}$	35	16
Cost of external inputs	$C_{ext,input}$	3500	1900
Cost of finished product	C_{PF}	500000	427500
Total gain	G	797000	975900
Total cost	D	503717.5s	430328,025
Profit	P	293282.5	545571,975

Table 4: The values of the parameters added by the symbiosis for factory j

Costs/gains	the gains/ costs	values /UM
sales turnover (inside SI)	$G_{si,i}$	6000
Internal symbiosis gain	G_{Int}	300
Symbiosis subsidies	S_{Si}	20000
cost of transport	$C_{trsp,si,input}$	2,2
	$C_{trsp,si,ouput}$	14
Environmental cost	$C_{env,si,input}$	0,5
	$C_{env,si,output}$	0,6
Social cost	$C_{soc,si,input}$	0,6
	$C_{soc,si,output}$	0,425
Storage cost	$C_{stor,si,input}$	4,4
Cost of internal inputs	$C_{si,input}$	760

The chosen values are generic (since the COVID-19 made it difficult to collect the data) and, therefore, the interpretations of the results may change.

According to data presented in tables 3 and 4 and based on the given values, we find that companies with higher earnings are those which participate in the symbiosis.

To study the behavior of our model, we should vary some parameters. Since we are still in the data collection phase, pending verification of our model, we limit ourselves to two variables. We choose to vary the cost of treatment because it is considered as the highest cost borne by the company, when the symbiosis takes place. In fact, most of flows must be transformed to reach the desired quality. These transformations require different technologies, which can be very expensive. However, sometimes the outgoing material flow is perfectly suitable for the second

company where the processing cost will be zero. This variation from extreme to extreme justifies our choice. Obviously, the increase in processing costs generates profits for the company. For this reason, we consider the total gains as our second variable.

It is assumed that each increase in the treatment costs is proportional to an increase of the business gains with a coefficient c = 0.02.

Different scenarios are considered and different profit values are obtained by varying the treatment cost in an interval [0, 600000], considering a step of 60000 UM. Figure 4 presents the resulting profit corresponding to the different scenarios.

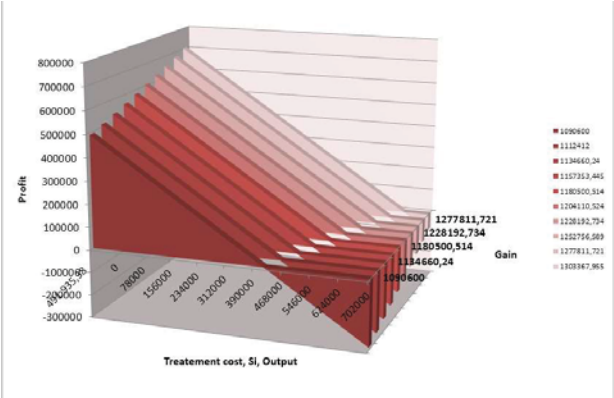


Figure 4: Variations of treatment cost and gain

Figure 4 shows the importance of the treatment cost. By varying the gains according to this cost, we can notice the impact on the profit of the company, which can tip over to have negative values.
I was limited in the simulation because of the sanitary conditions; this simulation will be improved as soon as the data is fully collected

Knowing the importance of the symbiosis in relation with the environment and since the realization of this is not obvious, the proposed modeling highlights direct and indirect impacts such as gains linked to pooling, increased market share (and better brand image of the company), etc. A company can therefore know its economic interest in the event that it participates in the symbiosis. These values can be a motivation to actively participate in industrial symbiosis.

6 CONCLUSION

In this paper, we try to explore the possibilities to establish a symbiosis on an industrial zone in the east of France. For this reason; we identified potential symbiotic flows that could exist between the companies. Then we propose a mathematical model based on economic approach to evaluate the profit of the company and we suggested a first simulation to verify the behavior of our model. We are currently in the data collection phase. As soon as this phase ends, we can check and validate our model.
Our previous works which have addressed IS on the strategic part (Nouinou, 2019) (Hennequin, 2019) focused mainly and the tactical level. The specificity of this paper is that we consider the operational part.

As a matter of perspective, first we will visit all the companies and collect the data necessary to improve our model and rectify it based on these concrete data and interviews. Secondly, even if the participation in the symbiosis seems "easy" and interesting, it is difficult to ensure the sustainability of the IS project. In fact, the difficulty of implementation and the resistance to change are considered as many brakes of real and concrete applications. For this reason, the effective participation of companies in the symbiosis can be partial. So we may consider a second case which represents a degradation of the participation by using for example game theory. We will then be able to define our complete decision-support tool allowing us to integrate different dynamic evolutions and the means to respond to them.

REFERENCES

ADEME, l'écologie industrielle et territoriale, site web visité le 14 juin 2020 (in French) https://grand-est.ademe.fr/expertises/produire-autrement/ecologie-industrielle-et-territoriale/lademe-soutient-la-dynamique-eit-en-grand-est

Boons, F. and Baas, L. 2006. Industrial symbiosis in a social science perspective. *In Discussion proposal for the Third Industrial Symbiosis Research Symposium, Birmingham, UK.*

Chertow, M. R. 2000.Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual review of energy and the environment, vol. 25, No 1, p. 313-337.*
[3] Chertow, M. R 2007. "Uncovering" industrial symbiosis. Journal of industrial Ecology, vol. 11, No 1, p. 11-30.

Daddi, Tiberio, Benedetta Nucci, and Fabio Iraldo. 2017,"*Using Life Cycle Assessment (LCA) to Measure the Environmental Benefits of Industrial Symbiosis in an Industrial Cluster of SMEs." Journal of cleaner production 147: 157–164. Web.*

Dong, Liang ; Zhang, Hui ; Fujita, Tsuyoshi ; Ohnishi, Satoshi ; Li, Huiquan ; Fujii, Minoru ; Dong, Huijuan,2013*, "Environmental and Economic Gains of Industrial Symbiosis for Chinese Iron/steel Industry: Kawasaki's Experience and Practice in Liuzhou and Jinan." Journal of cleaner production 59: 226–238. Web.*

Hennequin, Sophie, Ho, Vinh Thanh, LeThi, Hoai An, *Roy Daniel.* Industrial Symbioses*: Bi-objective Model and Solution Method. In : World Congress on*

Global Optimization. Springer, Cham, 2019. p. 1054-1066.

Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. and Kennedy, C.2013. Environment*: Waste production must peak this century. Nature News, vol. 502, No 7473, p. 615.*

MacArthur, E. 2013. *Towards the circular economy, economic and business rationale for an accelerated transition, Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK.*

Meadows, D., Randers, J. and Meadows, D. 2004. Limits to growth: The 30-year update. Chelsea Green Publishing.

Le Moigne, R. 2014. *L'économie circulaire: Comment la mettre en oeuvre dans l'entreprise grâce à la reverse supplychain?. Dunod, p 214 (In French).*

Morgan, J. and Mitchell, P. 2015. Employment and the circular economy: Job creation in a more resource efficient Britain. Green Alliance.

Nouinou, Hajar, Roy, Daniel, et Hennequin, Sophie. *Mathematical modelling for flows optimization within an industrial symbiosis. IFAC-PapersOnLine, 2019, vol. 52, no 13, p. 1319-1324.*

Odum, H. T. 1996. Environmental accounting: emergy and environmental decision making, New York: Wiley, vol. 707.

Sikdar, S. K.. 2003, *Sustainable development and sustainability metrics. AIChE journal, vol. 49, No 8, p.1928-1932*

Zhang, Yun ; Duan, Shasha ; Li, Jinhua ; Shao, Shuai ; Wang, Wenqiang ; Zhang, Shushen, 2017*, "Life Cycle Assessment of Industrial Symbiosis in Songmudao Chemical Industrial Park, Dalian, China." Journal of cleaner production 158: 192–199. Web.*

PARTAGE DE GAINS EN MUTUALISATION LOGISTIQUE : ETAT DE L'ART ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Nassim Mrabti[1], Nadia Hamani[1], Ridha Derrouiche[2], Dorsaf Khammassi[1], Laurent Delahoche[1]

[1] Laboratoire des Technologies Innovantes, Université de Picardie Jules Verne, Amiens, France
[2] Humanis, Ecole de Management de Strasbourg, Strasbourg, France
nassim.mrabti@u-picardie.fr, nadia.hamani@u-picardie.fr, derrouiche@unistra.fr, dorsaf.khammassi@u-picardie.fr, laurent.delahoche@u-picardie.fr

RESUME : *La collaboration horizontale est l'une des solutions innovantes pour améliorer les trois principaux aspects du développement durable. Cependant, le problème du partage des coûts représente un des principaux facteurs qui peuvent bloquer la réussite d'une telle collaboration. La littérature propose deux types de méthodes pour résoudre ce problème ; des méthodes classiques et celles basées sur la théorie des jeux coopératifs. Nous présentons dans ce papier plusieurs approches utilisées dans le cadre de la collaboration horizontale. Nous introduisons aussi les propriétés données par la littérature pour choisir l'approche appropriée. Nous citons plusieurs travaux classés selon les méthodes d'allocation utilisées ainsi que le type de problème traité. Finalement, nous présentons des perspectives et des suggestions pour des travaux futurs.*

MOTS-CLES : *Partage des coûts et des émissions de GES, Collaboration horizontale, Mutualisation, Durabilité.*

1 INTRODUCTION

Le transport de marchandises possède des effets nocifs sur l'environnement et la santé à cause de la forte consommation d'énergie comme les carburants pétroliers. En France, le transport terrestre prédomine et sa consommation d'énergie représente 33% de la consommation d'énergie globale en 2015 contre 29% en 1990. Ces émissions de GES (Gaz à Effet de Serre) dégagées par le secteur de transport provoquent plusieurs enjeux néfastes comme la réduction des espaces vertes, la pollution de l'air et le problème de santé publique. Selon Pérez-Bernabeu et al. (2015), les entreprises souffrent des pressions pour augmenter les coûts de distribution, ce qui influence négativement leur compétitivité. De plus, elles sont désormais contraintes de déclarer leurs performances au niveau de durabilité notamment les émissions de CO_2 dégagées par leurs activités. Les entreprises sont contraintes d'adopter des approches collaboratives pour survivre aux pressions. Comme le montre la Figure 1, il existe deux principaux types de collaboration : verticale et horizontale. Le premier type se fait entre des acteurs qui appartiennent à la même chaîne logistique et il se concentre principalement sur le partage de l'information entre le fournisseur et le client (Mrabti et al., 2020). Ce type de collaboration est largement analysé dans la littérature. Dans ce papier, nous nous concentrons sur le deuxième type appelé collaboration horizontale. Elle est obtenue lorsqu'il s'agit d'une collaboration entre des acteurs de même niveau, qui n'appartiennent pas à la même chaîne logistique et qui peuvent être des concurrents. La collaboration horizontale, appelée aussi mutualisation logistique, a comme objectif d'améliorer la performance de chaque partenaire par le biais de partage des moyens et des ressources.

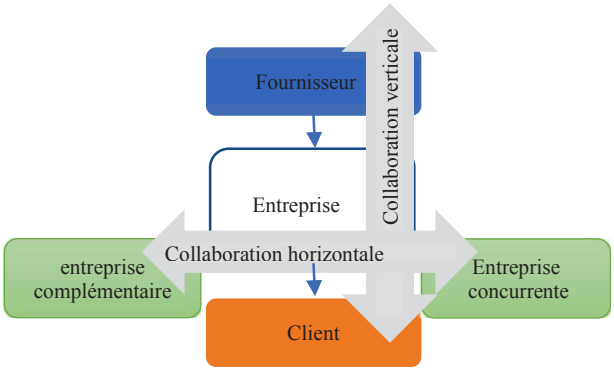


Figure 1 : Principaux types de collaboration logistique (Destouches et Gaide, 2011).

La collaboration horizontale a montré sa performance pour l'amélioration des différents aspects de développement durable, spécialement les deux piliers économique et environnemental. Cependant, il existe plusieurs facteurs qui peuvent bloquer sa réussite et sa continuité sur le plan pratique. Selon Zineldin et Bredenlöw (2003), plus de 70% des collaborations échouent. Malgré ce pourcentage élevé, la littérature a donné moins d'attention aux facteurs et barrières qui peuvent conduire à l'échec de la collaboration. Selon Cruijssen et al. (2007), ces menaces concernent généralement quatre domaines, à savoir : les partenaires, la détermination et la répartition des gains, la négociation et la coordination et les technologies de l'information et de la communication. Dans cette étude, nous nous concentrons sur le problème de répartition des gains.

Le reste de l'article est consacré à l'état de l'art des méthodes d'allocation dans la section 2, des perspectives

pour des travaux futurs dans la section 3 et finalement nous terminons avec une conclusion.

2 ETAT DE L'ART ET APPROCHES EXISTANTES

Les principales bases de données utilisées pour rechercher les articles sont *Google scolar*, *Sciencedirect*, *Wiley Online Library*, *Taylor & Francis*, *Emerald* et *Springer*. Les mots-clés sont définis par deux cycles de recherche. Le premier cycle consiste à cherche les articles contenant les deux principaux termes « *Cost allocation* », « *CO_2 emissions allocation* » ainsi que certains mots synonymes les plus proches « *Cost sharing* » et « *CO_2 emissions sharing* ». La deuxième phase consiste à ajouter des mots corrélés identifiés à partir de la revue primaire à savoir « Horizontal collaboration », « *Horizontal cooperation* », « *pooling* », « *Collaborative transportation* », « *Collaborative logistics* ». La majorité des publications étudiées sont des articles de revue datés de 2007 à 2020.

La Figure 2 montre les différents problèmes traités dans le cadre de la mutualisation logistique. Nous les avons classés selon les niveaux de décision (Amer et Eltawil, 2015).

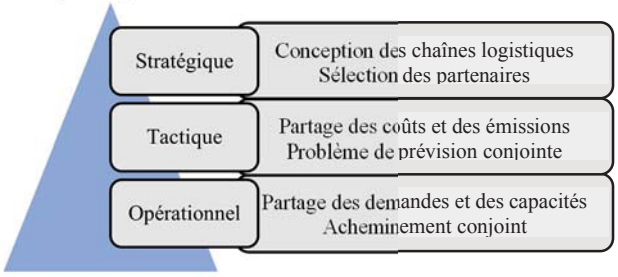


Figure 2 : Problèmes traités dans le cadre de la collaboration horizontale

Le niveau stratégique s'intéresse au problème de conception des chaînes logistiques et de sélection des partenaires. Le niveau tactique s'intéresse au problème du partage des coûts et des émissions de GES et au problème de prévision conjointe. Le niveau opérationnel s'intéresse à la répartition des capacités, à l'acheminement conjoint ainsi qu'à la répartition des demandes.

Dans ce papier, nous nous intéressons au problème du partage des coûts et des émissions de GES. En effet, il existe plusieurs points à négocier entre les partenaires avant la mise en place de la mutualisation. Parmi ces points, il s'agit de savoir comment le coût total ou les économies devraient être répartis entre les participants. D'autre part, avant de commencer une telle collaboration, une estimation des gains et une méthode de répartition juste doivent être disponibles, notamment le partage des gains au niveau des émissions de CO_2.

2.1 Typologie des méthodes d'allocation et leurs propriétés

La littérature évoque une large liste d'articles et d'applications qui traitent plusieurs méthodes d'allocation. Ces dernières sont principalement formulées pour répartir les gains entre les collaborateurs dans les scénarios collaboratifs. Kellner et Otto. (2012) ont classé ces méthodes en deux grands types, à savoir des méthodes classiques et des méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs.

Concernant, les méthodes classiques, elles sont simples et faciles à appliquer. Selon Frisk et al. (2010), les entreprises utilisent principalement les méthodes d'allocation les plus simples qui peuvent être facilement interprétées et offrent une certaine transparence. Comme le montre la formule (1), ces méthodes consistent à réaliser la répartition des gains en multipliant le coût total *C(N)* de la collaboration par un taux de pondération *α(i)* correspondant à chaque partenaire.

$$C(i) = \alpha(i) \,.\, C(N);\ \forall\, i \in N \qquad (1)$$

Ce taux peut être en lien avec le poids de la marchandise, le nombre de palettes, ou les distances parcourues, etc. Kellner et Otto. (2012) ont classé ces méthodes en deux sous-types en se basant sur leurs indépendances de distance. Dans les méthodes simples indépendantes de la distance, nous trouvons l'approche EA (*Egalitarian Allocation*) qui consiste à diviser le coût de manière égale entre les partenaires. L'approche PA (*Payload Weighted Allocation*) est exprimée en fonction de la charge de marchandises. La méthode SPA (*Allocation based on tours Stops and Payload*) consiste à partager les coûts en fonction du nombre total d'arrêts et du poids de marchandises de chaque partenaire. La deuxième catégorie regroupe les méthodes qui consistent à allouer les coûts en fonction d'un vecteur de pondération dépendant de la distance parcourue, à savoir DDA (*Direct Distance weighted Allocation*), CenA (*Centrality weighted Allocation*), ToKmA (*Tons-Km weighted Allocation*), SDA (*Separate Deliveries weighted Allocation*) ainsi que l'approche KTA (*Allocation basing on Tons-km*). Ces approches sont étudiées dans (Kellner & Otto, 2012). Les trois approches consistent respectivement à utiliser le taux de distance directe, le réseau de distribution centralisé et le coût de la livraison séparée de chaque partenaire. Ces approches sont faciles à appliquées mais elles ne sont pas tout à fait équitables parce qu'elles ne prennent pas en considération les coûts marginaux de chaque partenaire participant à une coalition. D'autre part, le partage des coûts selon la distance permet à certains partenaires de profiter des autres en envoyant des quantités de marchandises importantes à faible distance.

La deuxième façon pour traiter le problème d'allocation est plus avancée et elle consiste à utiliser des méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs. Selon Guajardo et Rönnqvist (2016), la plupart des problèmes de transport collaboratif utilisent les concepts et les méthodes de la théorie des jeux coopératifs. Ces approches modélisent un problème d'allocation en tant que jeu coopératif utilitaire transférable et développe des schémas d'allocation des coûts et des émissions de GES (Kellner et Otto, 2012). Elles ont été largement utilisées car elles sont considérées comme étant efficaces pour résoudre les conflits entre deux ou plusieurs partenaires. Selon Vanovermeire et Sörensen (2014), les concepts de la théorie des

jeux peuvent facilement être transférés au cadre de la distribution collaborative, et par conséquent, un problème de répartition des coûts ou des émissions de GES pourrait être abordé comme un jeu coopératif. Etant donné un ensemble de *N* partenaires, chaque partenaire *p* ayant un coût de distribution autonome *C*(*p*), représentant le coût devant être payé par le partenaire *p* pour livrer toutes ses commandes. La grande coalition *N* est définie comme la coalition de tous les partenaires. Pour toute sous-coalition $S \subset N$, il existe un coût de distribution *C*(*S*) à payer afin de satisfaire toutes les demandes. La littérature de la collaboration horizontale a identifié plusieurs méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs. Par la suite, nous citons les méthodes les plus connues et les plus utilisées dans la littérature.

- Shapley value : L'allocation de Shapley est l'une des méthodes les plus utilisées dans les jeux coopératifs. Comme le montre la formule (2), cette méthode consiste à attribuer à chaque partenaire une moyenne de son coût marginal généré par sa participation à la sous-coalition *S*.

$$C(i) = \sum_{S \subseteq N : j \in S} \left[\frac{(|N| - |S|)!\,(|S| - 1)!}{|N|!} \right]. \\ [C(S) - C(S \backslash \{i\})];\ \forall\, i \in N \qquad (2)$$

- Nucleolus : Cette méthode remonte à (Schmeidler, 1969). Elle a pour objectif d'allouer les coûts de telle sorte qu'aucun partenaire ne fera mieux en participant ou en quittant la sous-coalition. Étant donné que *V* l'ensemble des vecteurs avec des allocations de bénéfices efficaces, la formule (3) montre la série de programmes linéaires à maximiser pour partager les coûts. L'idée est de maximiser le plus petit excédent d'une sous-coalition *S*. La caractérisation la plus générale de (Moulin, 1988), qui inclut également des jeux à noyau vide, indique que cette méthode engendre un souci égalitaire des excès de diverses coalitions (Vanovermeire et Sörensen, 2014). En effet, le Nucleolus est l'unique allocation du coût total qui maximisera le plus petit excédent d'une coalition *N*.

$$Max_{x \in V} \left[Min_{S \subseteq N} \left(\sum_{i \in S} x_i - C(S) \right) \right] \qquad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_i = C(N) \qquad (4)$$

- ECM (*Equal Charge Method*) : Comme le montre la formule (5), cette méthode distingue entre les coûts séparables c'est-à-dire les coûts marginaux de chaque partenaire rejoignant la coalition finale et les coûts non séparables qui vont être répartis d'une manière égale entre les différents partenaires.

$$C(i) = C(N) - C(N \backslash i) \\ + \frac{C(N) - \sum_{j \in N} [C(N) - C(N \backslash j)]}{|N|};\ \forall\, i \in N \qquad (5)$$

- τ-Value: Cette méthode appelée aussi CGM (*Cost Gap Method*) est introduite par (Tijs et Driessen, 1986). Elle s'intéresse principalement à la répartition des écarts des coûts. Le coût alloué au partenaire comprend son coût marginal et une part du coût commun non séparable. Dans cette méthode d'allocation, le partenaire quitte la coalition tant qu'il y a une autre où il est le moins responsable des coûts.
- ACAM (*Alternative Cost Avoided Method*): Selon Kellner et Otto (2012), cette approche est similaire au τ-value. En effet, le coût total à répartir est divisé en deux parties : coûts séparables et coûts non séparables en fonction de la pondération donnée exprimant les économies marginales réalisées par chaque partenaire.

Comme il existe plusieurs méthodes, il est difficile de choisir la méthode appropriée pour avoir une allocation juste entre les partenaires. Pour cette raison, il existe des critères pour évaluer ces méthodes d'allocation (Young, 1985) et (Tijs et Driessen, 1986). Nous énumérons certaines des propriétés de base extraites de la littérature. Selon Dahlberg et al. (2017), il n'y a aucune méthode de répartition qui satisfait toutes les propriétés.

- Pareto-efficacité (P1) : cette propriété est l'une des principales propriétés de la théorie des jeux. Elle impose que le partenaire ne puisse réduire ses coûts sans ajouter des coûts supplémentaires aux autres partenaires.
- Rationalité individuelle (P2) : elle garantit qu'aucun partenaire ne profite en travaillant seul et refuse de collaborer.
- Anonymat (P3) : les partenaires qui sont identiques (génèrent le même coût dans chaque coalition) doivent se voir attribuer le même coût.
- Stabilité (P4) : cette propriété assure qu'aucun partenaire ne devrait pouvoir faire mieux en quittant une sous-coalition et en entrant dans une autre.
- Monotonie coalitionnelle (P5) : si la valeur d'une coalition augmente (diminue) alors que la valeur de toutes les autres coalitions reste la même, tous les acteurs de cette coalition devraient recevoir une part plus élevée (plus faible).
- Monotonie de la population (P6) : lorsqu'un nouveau partenaire rejoint une coalition avec aucun nouvel excédent, aucun des partenaires ne devrait en bénéficier.
- Propriété factice (*Dummy* en anglais) (P7) : si un partenaire ajoute zéro avantage à une coalition, il ne devrait pas recevoir une part des gains de la coalition.
- Additivité (P8) : cette propriété assure la non-influence de la répartition des coûts par la formation des coalitions plus importantes à l'avance.
- Décentralisation (P9) : la part d'un partenaire ne dépend que de son propre coût et du coût total de la coalition.
- Symétrie (P10) : cette propriété assure l'égalité de l'allocation des deux partenaires appartenant à une coalition dans le cas où ils possèdent le même coût marginal par rapport à toutes les autres coalitions.

Selon Kellner et Otto (2012), le raisonnement axiomatique pur n'est pas suffisant pour comparer entre les méthodes. Pour cela les auteurs suggèrent d'utiliser en plus d'autres critères de : Causalité en tonnes-km, Causalité de l'emplacement en tournée, Acceptabilité, Robustesse, etc.

2.2 Les approches existantes

Contrairement aux travaux de (Kellner & Otto, 2012) and (Guajardo & Rönnqvist, 2016), nous avons choisi de classer les approches existantes selon le problème traité et les indicateurs de durabilité évalués ainsi que les propriétés de chaque approche utilisée. Ces classifications permettent de choisir la méthode appropriée au problème traité. Nous citons par la suite quelques travaux qui ont traité le problème d'allocation via les deux catégories : classique et celle basée sur la théorie des jeux coopératifs.

Dans le cadre de la planification du transport collaboratif, Frisk et al. (2010) ont utilisé plusieurs méthodes d'allocation, à savoir la méthode Volume, la valeur de Shapley, le Nucleolus, le CGA, l'ACAM. L'objectif est d'allouer les coûts de transport générés par la collaboration de huit sociétés forestières situées au sud de la Suède. Selon Frisk et al. (2010), il serait avantageux d'avoir une allocation initiale où les économies relatives sont similaires autant que possible pour tous les partenaires. Pour cette raison, les auteurs ont proposé une nouvelle approche appelée EPM (*Equal Profit Method*). Dans un deuxième temps, les auteurs ont démontré que l'ECM et l'ACAM satisfont les deux propriétés Pareto-efficacité et symétrie. Tandis que le CGM vérifie la rationalité individuelle et la propriété fictive en plus.

Types de l'approche	Approches	Références	Propriétés									
			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Approches classiques	ABC	(Vanovermeire et Sörensen, 2014)	●				●					
	EA	(Habibi et al., 2018) ; (Kellner & Otto, 2012)	●									
	PA	(Dai et Chen, 2012) ; (Ramaekers et al., 2017) ; (Liu et al., 2010) ; (Kellner & Otto, 2012)	●									
	Volume	(Vanovermeire et Sörensen, 2014) ; (Defryn et al., 2014) ; (Habibi et al., 2018) ; (Defryn et al., 2019) ; (Hacardiaux et al., 2020)	●				●	●			●	
	CenA ; ToKmA	(Kellner & Otto, 2012)	●									
	KTA ; DDA	(Kellner & Otto, 2012)	●	●								
	SDA	(Kellner & Otto, 2012) ; (Hacardiaux et al., 2020)	●	●								
Approches basées sur la théorie des jeux coopératifs	ACAM	(Audy et al., 2011) ; (Frisk et al., 2010) ; (Defryn et al., 2014) ; (Kellner & Otto, 2012)	●									●
	CCPS	(Algaba et al., 2019)	●		●	●						●
	Core-centre	(Lozano et al., 2013)	●	●	●	●		●	●			
	Demand Nucleolus	(Engevall et al., 1998)	●	●	●	●		●	●			
	ECM	(Vanovermeire et Sörensen, 2014) ; (Frisk et al., 2010)	●	●	●		●				●	●
	EPM	(Audy et al., 2011) ; (Frisk et al., 2010)	●	●	●		●				●	●
	ES	(Algaba et al., 2019)				●						
	LEPM	(Dahlberg et al., 2017)	●	●	●		●				●	●
	Minmax core	(Lozano et al., 2013)	●	●		●						
	Nucleolus	(Özener and Ergun, 2008) ; (Vanovermeire et Sörensen, 2014) ; (Massol et Tchung-Ming, 2010) ; (Liu et al., 2010) ; (Engevall et al., 1998) ; (Vos and Raa, 2018) ; (Kellner & Otto, 2012)	●	●	●	●		●	●			
	Shapley value	(Lozano et al., 2013); (Özener and Ergun, 2008); (Vanovermeire et Sörensen, 2014) ; (Massol et Tchung-Ming, 2010) ; (Habibi et al., 2018) (Ouhader et El kyal, 2020) (Krajewska et al., 2008) (Liu et al., 2010) (Engevall et al., 1998) (Wong et al., 2007) (Vos and Raa, 2018) (Frisk et al., 2010) ; (Sanchez et al., 2016) ;(Kellner & Otto, 2012)	●	●	●	●	●		●	●		
	WRSA	(Liu et al., 2010) ; (Kellner & Otto, 2012)	●		●							
	τ-Value	(Lozano et al., 2013); (Frisk et al., 2010); (Engevall et al., 1998) ; (Leenders et al., 2017) ;(Kellner & Otto, 2012)	●	●	●	●			●			●

Tableau 1 : Récapitulatif des méthodes d'allocation et leurs propriétés

Frisk et al. (2010) et Vanovermeire et Sörensen. (2014) ont démontré la non stabilité de la méthode Volume vu qu'un partenaire peut faire réduire son coût en changeant la sous-coalition. L'allocation par la méthode EPM n'est pas toujours unique. Pour cela, Dahlberg et al. (2017) ont présenté une autre approche qui garantit une solution unique, c'est le LEPM (*Lexicographic Equal Profit Method*). En outre, Defryn et al. (2014) ont utilisé plusieurs méthodes pour répartir les coûts de transport. Parmi ces méthodes, nous trouvons la méthode Volume, la valeur de Shapley, le Nucleolus, l'ACAM et celle d'EPM. Massol et Tchung-Ming. (2010) ont étudié le problème d'allocation des coûts du transport collaboratif entre les fournisseurs en utilisant la valeur de Shapley et le Nucleolus. Vu que la pensée verte devient aussi un facteur de succès critique, Wick et al. (2011) ont utilisé la valeur de Shapley pour allouer les émissions de CO_2 dans le cadre de la mutualisation. Les auteurs ont eu recours à la simulation assistée par ordinateur et à la recherche opérationnelle pour remédier le problème de complexité de la valeur de Shapley. Dans le cadre d'un système de transport collaboratif, Algaba et al. (2019) ont proposé deux approches théoriques basées sur la théorie des jeux coopératifs appelées ES (*Egalitarian Solution*) et CCPS (*Coloured Cost Proportional Solution*). Les auteurs ont démontré que les deux méthodes sont stables. Leenders et al. (2017) ont utilisé deux types de méthodes pour allouer les émissions de CO_2 générées par le transport. La première est une méthode classique qui combine entre le volume et la distance parcourue pour satisfaire les clients. La deuxième est le τ-Value qui est une méthode basée sur la théorie des jeux. Dans cette étude, le τ-Value prend en considération la quantité commandée de chaque client, la distance origine-destination, la distance relative par rapport aux entrepôts ainsi que la distance relative par rapport aux autres clients.

Dans le cadre de la conception d'un réseau de distribution mutualisé, Habibi et al. (2018) ont utilisé trois méthodes pour allouer les coûts de la mutualisation entre les partenaires. Il s'agit de la valeur de Shapley, Volume, l'EA en faisant la moyenne où les coûts sont divisés d'une façon équitable entre deux réseaux de distribution. Les auteurs ont appliqué ces méthodes pour répartir les coûts générés par l'installation des hubs et le transport des marchandises. Dans le même contexte, Ouhader et El kyal. (2020) ont utilisé la valeur de Shapley pour allouer les coûts et les émissions de CO_2 générés par le transport lors de la conception d'un réseau de distribution mutualisé. Xu et al. (2012) ont utilisé la valeur de Shapley pour partager les coûts et les taxes sur les émissions de CO_2 générés par le transport de marchandises. En outre, Hacardiaux et al. (2020) ont introduit la rationalité individuelle des entreprises dans un modèle mathématique non linéaire pour tenir compte des préférences des entreprises. L'objectif est de permettre à chaque partenaire de préciser sa préférence concernant la diminution des coûts par rapport à la réduction des émissions de CO_2. Les auteurs ont utilisé l'approche « Volume » et l'approche SDA pour partager respectivement les coûts de localisation et de transport.

Il existe aussi des travaux qui traitent le problème de répartition des coûts dans le cadre de la distribution collaborative des marchandises. Lozano et al. (2013) ont traité le problème d'allocation des coûts de transport en se basant sur la théorie des jeux coopératifs dans le but de trouver un système équitable entre les partenaires. Les auteurs ont utilisé quatre méthodes pour allouer les coûts d'expédition des marchandises, à savoir Shapley, τ-Value, Corecentre et Minmax core. Les auteurs ont comparé les méthodes selon l'écart moyen absolu entre les parts des coûts attribués aux différents partenaires. Ils ont conclu que le τ-Value et celle de valeur de Shapley donnent des solutions trop proches. Audy et al. (2011) ont traité le problème de répartition des coûts de transport entre les partenaires d'une collaboration en utilisant L'EPM et l'ACAM. Les résultats obtenus ont montré que la collaboration horizontale répond aux exigences des entreprises immobilières et elle est acceptable par tous les partenaires. Dans un deuxième temps, les auteurs ont modifié la méthode EPM afin de garantir que le coût alloué à un partenaire soit toujours inférieur à son coût individuel avant la mutualisation. Il s'agit d'introduire un pourcentage minimum d'économie qui est supérieur à zéro. Selon les auteurs, la détermination de ce pourcentage est complexe et repose sur une négociation entre les partenaires. Dai et Chen. (2012) ont utilisé l'approche PA pour répartir les coûts générés par la livraison et la collecte dans le cadre d'une collaboration centralisée entre des transporteurs. Également, Ramaekers et al. (2017) ont utilisé la même approche dans le cadre d'une collaboration dans les réseaux de distribution multimodaux. Les coûts alloués sont générés par le transport et le stockage dans les plateformes logistiques. En outre, Özener et Ergun. (2008) ont utilisé la valeur de Shapley et la méthode Nucleolus pour répartir les coûts de la mutualisation entre les expéditeurs. Vanovermeire et Sörensen. (2014) ont utilisé plusieurs méthodes pour allouer les coûts de transport entre les partenaires, à savoir la méthode Volume, la valeur de Shapley, l'ECM, le Nucleolus ainsi que la méthode ABC (*Activity Based Costing*). Cette dernière consiste à répartir les coûts de la mutualisation en fonction du type d'activité. Les auteurs ont supposé que l'activité soit un voyage exécuté et que le facteur de coût est le nombre de voyages et le nombre de palettes transportés dans ce voyage. L'objectif étant de récompenser les partenaires les plus flexibles au niveau des délais de livraison.

Dans le cadre du problème des tournées de véhicules collaboratifs, Krajewska et al. (2008) ont utilisé la valeur de Shapley pour partager les coûts entres les transporteurs de marchandises. Liu et al. (2010) ont discuté quelques concepts de répartition des bénéfices tels que la méthode classique PA ainsi que deux méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs, à savoir la valeur de Shapley et le Nucleolus. Dans un deuxième temps, les auteurs ont proposé une nouvelle approche dénommée WRSA (*Weighted Relative Savings Allocation*) qui est basée sur le concept de la théorie des jeux coopératifs. Cette dernière consiste à minimiser la différence maximale entre l'épargne relative pondérée des participants. Sanchez et al. (2016) ont utilisé la valeur de Shapley pour répartir les émissions de

CO_2 dues au transport de marchandises. Engevall et al. (1998) ont utilisé la valeur de Shapley, le Nucleolus et le τ-Value pour allouer les coûts dans le cadre d'un problème du voyageur de commerce collaboratif. Dans un deuxième temps, les auteurs ont introduit un nouveau concept appelé Demand Nucleolus. Cette approche consiste à attribuer aux clients à forte demande un coût plus élevé. Les auteurs ont constaté que les trois premières méthodes donnent presque les mêmes répartitions des coûts. Certains auteurs ont traité le problème de répartition des coûts en lien avec la mutualisation des entrepôts. Wong et al. (2007) ont eu recours à la valeur de Shapley pour traiter la répartition des coûts dans le cadre de la mutualisation des stocks de pièces détachées. Ces coûts sont générés par la détention de stock, le temps d'arrêt et le transport. En outre, Vos et Raa. (2018) ont utilisé la valeur de Shapley et le Nucleolus pour allouer les coûts entre les détaillants. Les auteurs ont constaté qu'il est préférable d'utiliser le Nucleolus pour garantir la stabilité ainsi que les méthodes d'allocation proportionnelles qui sont faciles à appliquer mais elles ne sont pas stables. Defryn et al. (2019) ont utilisé la méthode « Volume » pour partager les coûts entre les partenaires dans le cadre du problème des tournées des véhicules. Les auteurs ont introduit la propriété de rationalité individuelle dans le modèle mathématique pour remédier aux limites de la méthode « Volume ».

Le tableau 1 présente un récapitulatif des méthodes d'allocation ainsi que leurs propriétés étudiées par certains articles. Les cases vides indiquent que la méthode ne vérifie pas la propriété ou bien l'absence des indications dans la littérature. Le tableau 2 résume les études, classées selon le problème traité et les indicateurs évalués.

Problèmes	Références	Aspect économique					Aspect environnemental
		Coût de transport	Coût de manutention	Coût d'installation	Coût d'inventaire	Arrêt des véhicules	Emissions de CO_2 dues au transport
Planification du transport collaboratif	(Frisk et al., 2010)	●					
	(Dahlberg et al., 2017)	●					
	(Defryn et al., 2014)	●					
	(Massol et Tchung-Ming, 2010)	●					
	(Wick et al., 2011)						●
	(Algaba et al., 2019)	●					
	(Leenders et al., 2017)						●
Conception d'un réseau de distribution mutualisé	(Habibi et al., 2018)	●		●			
	(Ouhader et al., 2020)	●					●
	(Xu et al., 2012)	●					●
	(Hacardiaux et al., 2020)	●		●			●
Distribution collaborative des marchandises	(Lozano et al., 2013)	●					
	(Audy et al., 2011)	●					
	(Dai et Chen, 2012)	●			●		
	(Vanovermeire et Sörensen., 2014)	●					
	(Ramaekers et al., 2017)	●			●		
	(Özener et Ergun, 2008)	●					
Problème des tournées de véhicules collaboratifs	(Krajewska et al., 2008)	●					
	(Liu et al., 2010)	●					
	(Sanchez et al., 2016)						●
	(Defryn et al., 2019)	●					
Voyageur de commerce collaboratif	(Engevall et al., 1998)	●					
Mutualisation des entrepôts	(Wong et al., 2007)	●			●	●	
	(Vos et Raa, 2018)	●					

Tableau 2 : Récapitulatif des approches utilisées pour la répartition des coûts et des émissions de GES

Après l'analyse de la littérature, nous constatons que la majorité des études examinent l'allocation des coûts logistique, notamment celui du transport. D'autre part, certaines approches ne sont pas suffisamment étudiées pour vérifier d'une manière exhaustive leurs propriétés. En outre, le développement durable est devenu une nécessité à prendre en compte dans les trois niveaux de décision. Les études l'ont pris en considération uniquement lors de la conception des réseaux de distribution et planification du transport ; tandis que le problème de partage des coûts et des émissions de GES est étudié sans prendre en considération l'interdépendance entre les différents aspects. Ce qui permet à certains partenaires de profiter des autres. Pour remédier à ces limites, nous présentons une liste des perspectives dans la section suivante.

3 PERSPECTIVES DE RECHERHE

Comme nous avons évoqué précédemment, plusieurs études ont traité le problème d'allocation. Cependant, chaque approche possède ses limites sur ses propriétés ou bien sur son applicabilité aux problèmes réels. Pour cela, il existe plusieurs perspectives. Nous citons dans cette section quelques perspectives pour des travaux futurs.

- Vérification des propriétés

Cette perspective vise à étudier les propriétés de chaque méthode et développer d'autres approches pour améliorer les propriétés des méthodes. En effet, les méthodes d'allocation sont largement traitées dans la littérature. L'étude

des propriétés (Pareto-efficacité , rationalité individuelle, stabilité, etc.) est l'un des outils utilisés pour choisir l'approche appropriée. Cependant, certaines méthodes ne sont pas suffisamment étudiées pour vérifier leurs propriétés. Pour cela, il s'avère intéressant de les étudier en détail, notamment les approches les plus connues. D'autre part, il est intéressant de proposer des solutions pour garantir l'efficacité des approches comme l'implication de la propriété de la rationalité individuelle dans le modèle proposé comme les deux études de (Defryn et al., 2019) et (Hacardiaux et al., 2020).

- Problèmes de grande taille

Les méthodes basées sur la théorie des jeux coopératifs sont des méthodes plus avancées que les méthodes classiques et elles sont appliquées dans tous les domaines qui nécessitent une répartition des gains. Cependant, ces méthodes sont trop limitées lorsqu'il s'agit des problèmes de grande taille à cause du nombre important des partenaires (Guajardo et Rönnqvist, 2016). Pour cela, il est important de proposer des méthodes approchées basées sur des approximations pour résoudre les problèmes d'allocation. Ceci peut être réalisé pour calculer la fonction caractéristique (coûts, émissions, etc.) dans les coalitions ou pour faire la répartition elle-même.

- Implication des différents aspects de durabilité

Comme le montre la Figure 3, les objectifs du développement durable sont définis principalement par les trois aspects, à savoir l'économique, l'environnemental et le social.



Figure 3 : Les trois axes de durabilité

La majorité des études, qui traitent le problème de la collaboration horizontale, s'intéressent seulement aux deux aspects économique et environnemental par l'évaluation des coûts logistiques et des émissions de GES. Il est important de traiter l'allocation d'autres types d'indicateurs, notamment les indicateurs sociaux. D'autre part, une estimation multi-objectif s'avère intéressante pour allouer les coûts. En d'autres termes, lors de l'allocation des coûts, par exemple, il est intéressant d'introduire l'impact de la participation de chaque partenaire sur tous les aspects et pas uniquement son impact sur l'aspect économique. Cette démarche permet d'encourager les partenaires à améliorer leur participation au développement durable.

- Récompense des partenaires selon leurs flexibilité et leur durabilité

Mrabti et al. (2020) et Vanovermeire et Sörensen. (2014) ont démontré que la performance de la mutualisation peut être améliorée lorsqu'au moins un des partenaires assouplisse ces conditions de livraison. En effet, l'assouplissement des temps de livraison permet de retarder une certaine quantité de marchandises pour la regrouper avec une autre. Ceci permet d'améliorer davantage le taux de remplissage des véhicules. Khammassi et al. (2019) ont suggéré d'utiliser un taux qui combine la participation de chaque partenaire au développement durable et son niveau de flexibilité lors du partage des coûts. L'utilisation de ce taux permet de récompenser les partenaires selon leur degré de flexibilité et leur participation à la durabilité. Il peut être une combination de plusieurs taux (niveau de flexibilité, taux de durabilité, etc.).

4 CONCLUSION

Le problème de répartition des coûts et des émissions de GES est un facteur important pour la réussite de la collaboration horizontale. La littérature propose deux grandes catégories d'approches d'allocations, à savoir les méthodes classiques et les méthodes basées sur la théorie des jeux. Le choix d'une méthode est réalisé en fonction de plusieurs critères et propriétés. Nous avons cité dans ce papier les principales propriétés ainsi que de multiples méthodes d'allocations qui ont été appliqué dans le cadre de la collaboration horizontale (transport collaboratif, distribution collaborative, conception des réseaux de distribution mutualisés, etc.). Nous avons répertorié une liste des perspectives dans le but d'améliorer l'efficacité des approches utilisées, d'encourager les partenaires à assouplir leurs conditions de livraisons et d'améliorer leurs participations au développement durable. Ces perspectives permettent de remédier aux limites des approches et d'introduire d'autres critères comme les notions de durabilité et de flexibilité.

REFERENCES

Algaba, E., V. Fragnelli, N. Llorca, and J. Sánchez-Soriano, (2019). Horizontal cooperation in a multimodal public transport system: The profit allocation problem. *European Journal of Operational Research,* 275(2), p. 659-665.

Amer, L. E., and A.B. Eltawil, (2015). Analysis of quantitative models of horizontal collaboration in supply chain network design : Towards "green collaborative" strategies. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), 1-10.*

Audy, J.-F., S. D'Amours, and L.-M. Rousseau, (2011). Cost allocation in the establishment of a collaborative transportation agreement—An application in the

furniture industry. *Journal of the Operational Research Society,* 62(6), p. 960-970.

Cruijssen, F., M. Cools, and W. Dullaert, (2007). Horizontal cooperation in logistics: opportunities and impediments. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(2), p. 129-142.

Dahlberg, J., M. Göthe-Lundgren, and S. Engevall, (2017). A note on the nonuniqueness of the Equal Profit Method. *Applied Mathematics and Computation,* 308, p. 84-89.

Dai, B., and H. Chen, (2012). Profit allocation mechanisms for carrier collaboration in pickup and delivery service. *Computers & Industrial Engineering,* 62(2), p. 633-643.

Defryn, C., Sörensen, K., and Dullaert, W. (2019). Integrating partner objectives in horizontal logistics optimisation models. *Omega*, 82, p. 1-12. https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.11.008.

Defryn, C., C. Vanovermeire, K. Sörensen, A. Van Breedam, B. Vannieuwenhuyse, and S. Verstrepen, (2014). Gain sharing in horizontal logistic collaboration : A case study in the fresh fruit and vegetables sector. *From University of Antwerp, Faculty of Business and Economics. Research Papers in Economics – RePEc.* https://econpapers.repec.org/paper/antwpaper/2014004.htm

Destouches, G. et F. Gaide, (2011). Pratiques de logistique collaborative: quelles opportunités pour les PME/ETI ? Report, Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (PIPAME).

Engevall, S., M. Göthe-Lundgren, P. Värbrand, (1998). The traveling salesman game: an application of cost allocation in a gas and oil company. *Annals of Operations Research,* 82, p. 203–218.

Frisk, M., M. Göthe-Lundgren, K. Jörnsten, and M. Rönnqvist, (2010). Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research,* 205(2), p. 448-458.

Guajardo, M., and M. Rönnqvist, (2016). A review on cost allocation methods in collaborative Transportation. *International Transaction in Operational Research.* 23, p. 371–392.

Habibi, M. K., H. Allaoui, and G. Goncalves, (2018). Collaborative Hub Location Problem under Cost Uncertainty. Computers & Industrial Engineering, 124, p. 393-410.

Hacardiaux, T., Defryn, C., Tancrez, J-S., & Verdonck, L. (2020). Balancing partner preferences for logistics costs and carbon footprint in a horizontal cooperation. *Maastricht University, Graduate School of Business and Economics. GSBE Research Memoranda*, No. 002. https://doi.org/10.26481/umagsb.2020002

Kellner, F., and A. Otto, (2012). Allocating CO2 emissions to shipments in road freight transportation. *Journal of Management Control,* 22(4), p. 451-479. 6.

Khammassi, D., N. Mrabti, N. Hamani, and L. Delahoche, (2019). Partage des coûts/bénéfices et émissions de GES après mutualisation logistique, *12ème Conférence Internationale de la Logistique et le Supply Chain Management, LOGISTIQUA 2019, Paris, France, 12-14 Juin 2019.*

Krajewska, M. A., Kopfer, H., Laporte, G., Ropke, S., and G. Zaccour, (2008). Horizontal cooperation among freight carriers : Request allocation and profit sharing. *Journal of the Operational Research Society,* 59(11), p. 1483-1491.

Leenders, B.P.J, J.C. Velázquez-Martínez and J.C. Fransoo, (2017). Emissions allocation in transportation routes. *Transportation Research Part D*, 57, p. 39-51.

Liu, P., Y. Wu, and N. Xu, (2010). Allocating Collaborative Profit in Less-than-Truckload Carrier Alliance. *Journal of Service Science and Management,* 03(01), p. 143-149.

Lozano, S., P. Moreno, B. Adenso-Díaz, and E. Algaba, (2013). Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research,* 229(2), p. 444-452.

Massol, O., and S. Tchung-Ming, (2010). Cooperation among liquefied natural gas suppliers : Is rationalization the sole objective? *Energy Economics,* 32(4), p. 933-947.

Moulin, H., (1988). Axioms of cooperative decision making. *Econometric society monographs. Press Syndicate of the University of Cambridge.*

Mrabti, N., N. Hamani, and L. Delahoche, (2020). The pooling of sustainable freight transport. *Journal of the Operational Research Society,* p. 1-16.

Ouhader, H., et M. El Kyal, (2020). Assessing the economic and environmental benefits of horizontal cooperation in delivery: Performance and scenario analysis. *Uncertain Supply Chain Management,* 8, p.303–320.

Özener, O. Ö., & Ö. Ergun, , (2008). Allocating Costs in a Collaborative Transportation Procurement Network. *Transportation Science,* 42(2), p. 146-165.

Pérez-Bernabeu, E., A. A. Juan, J. Faulin, and B. B. Barrios, (2015). Horizontal cooperation in road transportation : A case illustrating savings in distances and greenhouse gas emissions. *International Transactions in Operational Research,* 22(3), p. 585-606.

Ramaekers, K., L. Verdonck, A. Caris, D. Meers, D., and C. Macharis, (2017). Allocating collaborative costs in multimodal barge networks for freight bundling. *Journal of Transport Geography,* 65, p. 56-69.

Sanchez, M., L. Pradenas, J-C. Deschamps, and V. Parada, (2016). Reducing the carbon footprint in a vehicle routing problem by pooling resources from different companies. *Netnomics*, 17, p. 29-45.

Schmeidler, D., (1969). The nucleolus of a characteristic function game. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 17(6), p. 1163–1170.

Tijs, S., and T. Driessen, (1986). Game theory and cost allocation problems. *Management Science,* 32(8), p. 1015–1028.

Vanovermeire, C., and K. Sörensen, (2014). Integration of the cost allocation in the optimization of collaborative bundling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 72, p. 125-143.

Vos, B. D., and B. Raa, (2018). Stability Analysis of Cost Allocation Methods for Inventory Routing. *IFAC-PapersOnLine,* 51(11), p. 1682-1688.

Wick, C., M. Klumpp, C. Kandel, (2011): Shaplay value simulation for allocating GHG emission savings due to logistics pooling within ECR cooperations. *The 2011 European Simulation and Modelling Conference, Conference Proceedings October 24-26, 2011, Guimaraes, Portugal, page 240-244.*

Wong, H., D.V. Oudheusden, and D. Cattrysse, (2007). Cost allocation in spare parts inventory pooling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 43(4), p. 370-386.

Xu, X., S. Pan, and E. Ballot, (2012). Allocation of Transportation Cost & CO2 Emission in Pooled Supply Chains Using Cooperative Game Theory. *IFAC Proceedings Volumes,* 45(6), p. 547-553.

Young, H. P., (1985). Cost allocation. In Fair allocation. *Proceedings of symposia in applied mathematics*, 33, p. 69-94. *Providence: Am. Math. Soc.*

Zineldin, M., and T. Bredenlöw, (2003). Strategic alliance : Synergies and challenges: A case of strategic outsourcing relationship "SOUR". *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 33(5),* p. 449-464.

13the International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'20 – November 12-14, 2020- Agadir – Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

Linking 4.0 Technologies and performance indicators based on a reference Model for supply chain

Y. EL KIHEL A. AMRANI and Y. DUCQ
Univ.Bordeaux, Laboratory IMS, France yousra.el-kihel@u-bordeaux.fr, aicha. zouggar-amrani @u-bordeaux. yves.ducq@u-bordeaux.fr

ABSTRACT:

The challenge in the context of a supply chain is to provide a broad visibility of the decisions and imperatives necessary to achieve a reliable business network. Several performance models exist but none specifically related to supply chain decisions based on modelling. Moreover, the enormous amount of data collected for the control of supply chain leads often enterprise to implement technologies 4.0 without a clear vision of their requirements in terms of indicators. In this work we will present a complete methodology to help enterprises to control their supply chain and to choose the best technologies 4.0 to support their indicators. This methodology is based of supply chain decision reference models called Grailog based on the Grai method. The objective is to enrich the functions in order to provide decision support with the most comprehensive decisions. We will analyze how these technologies 4.0 are likely to support the reliability of performance indicators to make them "smarter" and best support decision-making throughout the supply chain.

KEYWORDS: *Industry 4.0, Technologies 4.0, Supply chain Model, Performance Indicator, Supply chain 4.0, Automobile industry*

1 INTRODUCTION

The last decade has seen the emergence of the notions of corporate network, supply chain and extended enterprise. These notions highlight that any product is the result of group companies work, organized in more or less structured networks. The mastery of global logistics is a complex and transversal phenomenon (Morana 2017). Complex in the sense that the supply chain can be extended and involves multiple and varied partners (public authorities, industrialists, distributors, assemblers, etc.). The speed of traffic and the tension of flows is constantly increasing and the constraints to be respected, both contractual and regulatory, are becoming numerous (Baglin 2013).

To manage their supply chain, companies seek to manage their activities in an optimal way by playing both on the organization of their productive process on a global scale and on their information system allowing them to steer this organization. To meet this challenge, the logistics processes in companies in all industries must of course be digitized and optimised accordingly. Companies that operate in international markets, such as the automotive industry, and have a large customer base, in particular, must make heavy decisions and digitalise their internal and external logistics and more broadly their global supply chain in order to improve the flow of information and not threaten their sales.

The basics of digital logistics are processes and objects that can be controlled, organized and qualified as smart (intelligent). In this context, we are also talking about intelligent logistics or 4.0 logistics. GPS, RFID, cloud computing architectures, computerized data interchange (EDI), large data, telematics and many others are used. A functional intralogistics system is the key to efficient production in Industry 4.0.

Beyond the production aspect described above, logistics 4.0 supports the performance of the global supply chain. It allows the networking and nesting of processes, objects, supply chain partners and customers through information and communication technologies with decentralized decision-making structures to increase effectiveness and efficiency

However, companies need to be guided to the most relevant technologies to use to drive their logistics. In order to ensure a better management organization for a global management of the global supply chain this work proposes an original methodology allowing companies to choose the best technologies from industry 4.0 to drive their supply chains. The originality of the proposed approach consists in starting from the decisions necessary for the management of the logistics. Then it deduces the objectives and the means of actions to manage it and finally select the most relevant technologies to make the system of indicators, reliable, available and manage from the strategic level to the real-time indicators. The originality of the proposed methodology is also to select steering decisions in a reference model that will also be explained in this paper. The technologies of industry 4.0 will be selected on the basis of the benchmarking indicators related to these

decisions, which will also be given in this article. Thus, section 2 proposes a state of the art of the reference models for supply chains and technologies of Industry 4.0. The proposed methodology will be presented in a second step, as well as the proposed reference model for supply chain management and the selected technologies. Finally, the most relevant technologies for each step of the indicator life cycle, the reference model of monitoring indicators to measure the performance of the supply chain and the technologies of Industry 4.0 most relevant to support each group of indicators in its reliability, availability and updating will be presented.

2 LITERATURE REVIEW

2.1 Methodology and reference models for supply chains

According to the literature review (Ducq 2007), there are several methods that allow to measure the performance of large industrial enterprises, and several works have been done on the modelling of the supply chain. Among these models one can mention the most famous in logistics: the SCOR model (Apics 2017), the reference model EVALOG (2004), the logistic guide ASLOG (2006), and the VRM (Value Chain Group, 2007).
The table 1 below presents our comparative study of the supply chain management reference models.

Criteria of comparison		SCOR	SCM	ASLOG	BSC	EVALOG	GRAI	VRM
Sector	Industry					×		
	SME		×					
	Distribution				×			
	All sectors	×		×			x	×
Modeling	Process	×		×		×		×
	Desicional						x	
	Indicators	×		×	×			
Decision level	Strategic level		×		×		x	×
	Tactical level	×	×	×	×		x	
	Operational level	×		×		×	x	×
Flows analysed	Physical flow	×	×					
	Information flow	×	×	×	×	×	x	×
	Financial flow	×		×	×			
Benchmark	Internal	×	×	×	×	×		×
	External	×			×			×

Table 1. Comparison of SCM reference models

This study shows that all of these models propose a process models and indicators, but excepted GRAI, none of them present a decisional reference model.

2.2 Technologies in Industry 4.0

The "Industry 4.0" concept was built on digital technologies to make manufacturing more flexible, agile and more responsive to customer needs. The real-time acquisition of data, the ability to process them with advanced means and the use of internet and sensors make the factory better controlled. Today it is possible to create a smart factory where the Internet, wireless sensors, software and other advanced technologies are used to optimize production in cost and quality and improve customer satisfaction. According to (Moeuf 2017) Industry 4.0 is an industrial management concept aimed at real-time synchronization of different flows and customized product production.

According to (Mayer, 2017) the industry of the future refers to factories connected, made flexible and intelligent through the networking of machines, products and people. Several technologies have been identified in the literature.

The integration of different digital technologies in the industry offers many advantages especially when they are connected. These tools (table 2) enable the company to respond more quickly to market fluctuations, to offer more customized products and to increase its operational efficiency as part of a continuous improvement cycle. They are also very effective in supporting decision-making (Dombrowski et al.2017).

Pillars of Industry 4.0 enabling technologies	Description
Big Data et Analytics	The presence of sensors on machines and products makes it possible to collect large amounts of data. With the right processing and analysis tools, this data allows to optimize the production chain by identifying very fine problems that occur. They also increase knowledge of consumer habits and preferences.
Robotization	Today, we know how to create robots that work more autonomously, more flexibly, and in greater cooperation with operators.
Horizontal and vertical information systems	Information systems should facilitate intra- and inter-company integration and communication. They help to automate supply, production and distribution chains, but also to create closer links between the different departments of the companies, in order to best meet the demand.
The Industrial Internet of Things	Thanks to the sensors on the machines and the objects being manufactured, the machines can know the production history of the object, the corresponding final demand in order to respond to it in an automated way or via a central control station. You can also, through the Internet of Things, collect data during the use of the product in order to learn what features are used and to discover the modes of failure.
Cybersecurity	The diffusion of digital technology and the increase in communications that accompanies it make cybersecurity a major issue for industrial companies. Many "4.0 ready" hardware suppliers have thus joined forces with cybersecurity specialists to propose solutions that integrate this aspect.
Cloud	The cloud is already widely used for software and data management. The greater interconnection of production sites and departments within the company requires the sharing of large amounts of data, made easier by the cloud.
Additive manufacturing	This technology raises many hopes. In addition to the production of prototypes, additive manufacturing already allows the production of small series of complex parts, spare parts and even custom tools. Print speed and accuracy are expected to increase and enable larger-scale production.
Augmeted reality	One possible use is to provide the service operator with information on repair techniques for a part, for example by wearing augmented reality glasses. This technology can also be used for training, or make design steps less abstract to involve more stakeholders.

Table 2. Technologies 4.0 commonly admitted in literature (Mayer 2018)

In the literature, numerous techniques and methods are cited for deploying digital transformation and improving performance towards a 4.0 enterprise. The choice of these techniques and methods depends in particular on the strategic orientations, the stakes, the internal and external contexts and the available resources, both human and technological. Although in (Hermann et

al.2015), the authors refer to Cyber-Physical Systems, the Internet of Services and the Internet of Things as the basis for Industry 4.0 technologies, other authors have taken a broader view: (Gamache 2019) conducted a study of 51 publications to highlight the tools most frequently associated with Industry 4.0 such as Big data, Smart factory, Cloud computing, Internet of things, M2M, Internet of services, additive manufacturing...
From our literature review one can highlight technology groups related to Industry 4.0. For this purpose, this work exploited a list of 15 most relevant technology groups that can be organized as follows: ***Big Data / Artificial Intelligence, RFID, Digital Twin, Cloud Computing, Cyber Physical System, M2M Communication, Virtual Reality, Cyber Security, Internet of Things (IoT) Energy Internet, Collaborative Robots, Additive Manufacturing & 3D Printing, Machine Learning, Simulation and Internet of Services (IoS).***

The first vocation of 4.0 technologies will be to support the process of updating indicators in order to provide them as close as possible to decision makers and to make them reliable and displayed correctly. An analysis of the life cycle of a performance indicator was conducted to consistently support each of its development phases. The proposed contributions of Technologies 4.0 to the different phase of PI life cycle are detailed in the section 4.

3 METHODOLOGY

3.1 The global PERFLOG Method

In parallel with the development of new forms of management, we have witnessed the emergence of new, more flexible Industry 4.0 technologies that are changing production methods and the operating rules of logistics systems. It is currently difficult for companies to choose which technologies are best suited to their management methods and generally to their needs.

The stated objective of the methodology proposed in our research work is to allow companies to choose in coherence the control and monitoring modes (decision and indicators) and technologies of the 4.0 industry in order to set up a real logistics 4.0. These modes of control and monitoring must be based on process models, some of which have been described in the previous section, but also on decision-making models.

The PERFLOG methodology proposed in Figure 1 achieves the objectives presented above. In a first step it proposes the decisional modeling of the supply chain design by proposing a reference model of SC design decisions. This reference model will not be presented in this article. In a second phase, PERFLOG proposes the modelling of the operating decisions of the supply chain, based on a second reference model that will be slightly presented below. The third, fourth and fifth steps are dedicated to defining objectives, decision variables and performance indicators. The final stage is dedicated to linking indicators and technologies in Industry 4.0.

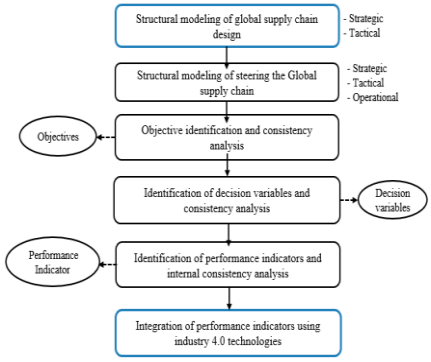


Figure 1 : PERFLOG Method

3.2 Global Supply Chain decision modeling

Global supply chain decision modeling is a complex task because it requires mastery of the chain's components and modeling to optimize processes and reduce the logistics costs associated with production, storage and distribution.

To do so, this work wants to design a grid adapted to this perimeter which is more and more requested by the companies in order to better control the flows of their supply chain. Modeling is an essential step to understand, analyze and master the process of the entire supply chain. In this phase, we propose decisional reference models.

The originality is that companies can use these reference models to design and manage the supply chain. They are not obliged to select all the decisions proposed in the model but must at the end ensure the coherence between all the selected ones in order to have a real decision system and not only disparate decisions.

Two reference models (for SC design and SC operations) were therefore defined in this research work. These reference models are based on the GRAI model and in particular the GRAI grid.

The first GRAI grid of reference developed, GRAILOG-Cop, is a grid for the control of the SC design (how to control the design of the network of partners in a supply chain up to its implemented operation. In order to enrich the existing GRAI model the existing process models (as SCOR) were considered in order to achieve a better exhaustiveness in the functions (Summary Table 2). Therefore, it is important to converge towards design decisions in a supply chain, *this is the usefulness of the Grailog-cop proposal.*

The second reference model, GRAILOG-Exp, means Grailog Exploitation (operation) aims in step 2 to build the supply chain operations control.

This work intends to disconnect the design from the operation even if both must be coherent. This is why the first grid must be elaborated before the second one. Both reference models are intended to be modular, linking two phases. In the GRAILOG-Exp grid, the selected monitoring functions are also inspired from the SCOR model, which is essential in a supply chain because it allows visualization by key process: PLAN, SOURCE, MAKE, DELIVER, and RETURN and other added columns expressing the "vital functions" of monitoring a company or a network of companies: Manage sales, industrialization, and "more recent functions": Manage sustainable development and social responsibility and Manage crisis/risks. All the functions of the GRAILOG-Exp model are justified and referenced in the literature by standards such as RSE, ASLOG... and standards such as ISO 9001, ISO 26000 in order to have a global management of the supply chain.

Without going into the details, the table 3, presenting the Grailog grid of KPI's, shows the list of functions selected in the GRAILOG-Exp reference model.

3.3 Identification of performance indicators

The identification of performance indicators in the PERFLOG method is based on the ECOGRAI method (Ducq 2005) which proposes to define the indicators based on the objectives and decision variables relating to each decision. The identification of indicators is therefore divided into three phases.

Thus, the third phase of our methodology, consists in identifying the objectives for the global Supply Chain and then supply chain decisions. Based on the models studied, a set of main objectives is proposed by decision for each of the two grids GRAILOG-Cop and GRAILOG-Exp. The selected objectives come from a bibliographical research (SCOR, Value Reference Model (Mohammadi and Mukhtar, 2018) which showed a preponderance of certain objectives compared to others. Thus, 6 performance areas were selected: Reliability, responsiveness, cost, quality, innovation, environmental and social aspect. Then, in the fourth phase, decision variables are identified that represent the variables on which decision-makers act to make the system evolve so that it can achieve its objectives.

Identification of performance indicators (PI Grid)

In the fifth phase, decision makers need to identify their performance indicators that will be consistent with their objectives and decision variables. To help them in this direction, the PERFLOG method proposes a KPI's grid for each proposed function of the exploitation grid (Table 3). The indicators chosen are based on three performance measurement frameworks: SCOR, ASLOG, and BSC. This KPI grid gives generic indicators for each function that appear to be important in any type of industrial sector. Of course, this grid is not exhaustive and other indicators can be proposed.

4 THE CONTRIBUTION OF INDUSTRY 4.0 TO PERFORMANCE INDICATORS

4.1 Industry 4.0 technologies at the service of performance indicators and supply chain management:

The first five steps of the PERFLOG methodology make possible to identify a number of relevant indicators.
However, performance indicators must, on the one hand, be SMART (Simple, Measurable, Accessible, Realistic and Time-bound) and must therefore updated where and when necessary for decision. For this reason, some technologies in Industry 4.0 can help in this direction, and the rest of this work proposes to list the main technologies useful for indicators for each step of their life cycle and to target more precisely which technique can be used for which group of indicators.

4.2 PI Life Cycle and Technologies 4.0

The first analysis starts by observing the different phases of obtaining a performance indicator. In order to make it more reliable and SMART, all phases of what could be called an "PI lifecycle" must be properly powered and supported by 4.0 technologies.

As shown in Figure 2, the obtaining of an indicator must begin with the acquisition of the required data. The "data acquisition or ETL" is the phase 1of the birth of an IP, then follows the phase of "data storage or datawarehouse" then the phase of "calculation" and the final phase which is the display of indicator useful for the decision-maker.
The technologies identified in the previous paragraph form the basis of our cross-analysis.
The Figure 2 below shows the contribution of each technology to a phase of the indicator's life cycle.

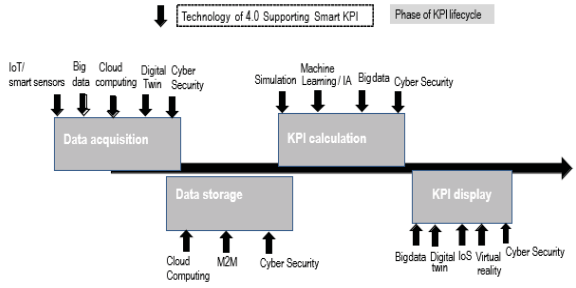


Figure.2: Technologies 4.0 supporting KPI lifecycle

Data acquisition: In this phase it is essential to have reliable, relevant data in the nearest field and in real time. Often, ETL (Extract Transform Load) tools are used but in a very traditional way. Big data is interesting in this phase to process all the required data. Given the importance of the data flow, it can be assigned to most phases of the acquisition, calculation and restitution life cycle. Data Storage is only a repository and data cleaning for which big data processing is not necessary. For the

digital twin, data is injected into a simulation and a virtual representation, which is made to evolve as its ages. This allows for interesting data capture and visual restitution to be considered in two phases: "acquisition data" and "KPI display". The Iot connects an ever-growing number of systems, devices, sensors, and people through both low-power extended wireless networks and high-capacity wired networks. It makes it possible to improve the data collection system, in particular via the RFID, RTLS, and its help is crucial in the data acquisition phase. Cloud computing naturally falls into the category of data acquisition but mainly data storage, as it includes cost-effective data processing and storage solutions. The growth of connected objects in production, mobile devices and the cloud requires a company to develop it security management (Cyber security) associated with data storage to ensure that data that are stored and transiting over the network are not vulnerable to cyber-attacks. In the KPI calculation the chosen technologies allow to do the calculation like simulation and machine learning / artificial intelligence. These techniques are interesting to support the concatenation of indicators. Machine Learning techniques make it possible to fully exploit the potential of Big Data in the calculation of performance. For the KPI display, are retained the technologies of display and communication that allow to visualize the instantaneous performance, in time in trend..., like the virtual reality, or the digital twin. They add visual information to reality in order to facilitate maintenance, assembly, equipment control, product design, etc.
The technologies analysed and considered interesting were selected for implementation and management assistance. Each decision-maker will be able to judge the criticality of one of the phases and implement the appropriate 4.0 technologies.
One can also consider that some technologies prove to be interesting at several phases of the life cycle (such as digital twin and cloud computing) but also that some technologies are useless for PI implementation and usage such as 3D printing which does not interfere in any of the phases of the PI life cycle.

4.3 Results and first application on PSA

The following grid (Table 3) reflects the functions and decision levels of the GRAILOG-Exp grid explained above. Decisions are not given but reference performance indicators are proposed for each function at each decision level. These performance indicators are necessary for decision-making by function throughout the SC.
The objective here is to show the contribution of each technology to the identified PI's. This analysis is complementary to the previous analysis concerning the link between technologies and the life cycle of each indicator.
A colour code is used to observe the contribution of each 4.0 technology in the implementation and usage of the indicators.

This work shows that all these techniques can be very useful for performance evaluation and can therefore help the company that wants to efficiently manage its supply chain to know which indicators would be the most relevant and which technologies can accompany these indicators.

The model has been applied in an automotive company of the PSA Morocco group. The PSA Group, with a more than 200 years as a history in the automotive world through its 3 brands "Peugeot, Citroën and DS", is the 2 nd European automobile manufacturer operating worldwide. The PSA plant in Kenitra is an automotive production site located at the Atlantic Free Zone. The site has 3000 employees and produces the Peugeot 208. Its production capacity is 200,000 vehicules by year, with an integration rate of 60%. After analyzing the production process and the different activities of supply chain with production and logistics managers.About twenty interviews took place with these managers at the rate of one hour by interview, we identified on the basis of the reference models, decisions of monitoring with about twenty of them proposed by our model, seven objectives and about ten performance indicators are selected. The model allowed a decision support according to the three decisional levels to monitor the decisions of PSA supply chain. The model designed integrates all the functions of the supply chain, allows too well understand the PSA's supply chain which remains valid for any industry. We found that the decision system of the PSA Kénitra group is in adequacy with our model.
This study is under development and the enrichment of the decisions, objectives and indicators is still pursued. The proposed is model is targeted to fit as much as possible the complex supply chain relality with the majority of the functions (strategies, objectives, decision variables, indicators...) chosen with some specific adjustement to PSA Morocco.
A diagnosis of the supply chain is in progress on new technologies of the 4.0 industry to analyze their degree of integration in various supply chain activities and their impact on competitiveness. The results will be published in a forthcoming communication.

5 CONCLUSION

This paper presents the PERFLOG Methodology with the ideas for new reference decision-making models of the supply chain GRAILOG-Cop and GRAILOG-Exp from the design of a network of partners to the exploitation of the supply chain. During the operational phase, indicators become a key issue for decision making. So, this work presents also a reference grid for performance indicators. However, the implementation and usage of these PI is crutial for the appropriate control of the SC. So, it is proposed to link the 4.0 technologies to the different life cycle phases of the PI's and to each Pi presented in the reference grid.

This new methodology highlignts big data, artificial intelligence, digital twin and Iot and brings factors of competitiveness, optimizing management on a large scale certainly useful for instance for the automotive industry and its ecosystem suppliers, customers, etc.

Table 3. The Grailog/Exp KPI'S grid integrating the new technologies from industry 4.0

	External Info	Manage commercial	Manage industrialization	Manage purchasing and procurement	Manage raw material quality	Manage production	Managing quality of the fFnished Product	Manage technical production resources	Manage production human resources	Manage the Social responsibility and sustainable development	Managing the crisis and risks	Manage distribution	Manage returns	Internal Info
Strategic level H = 5 years P = 6 months	Market evolution	Adopt an innovative business strategy Sales achieved/sales targets. - Distribution cost/sales. . Cost of commercial function / sales	Multisites Productions -Speed in prototyping -Product cost Reduced ressources	Multisourcing/monosourcing strategy -Active suppliers monitored Number of Partner suppliers.	Supplier Evaluation - Quality of service from suppliers. - Reliability of suppliers	Perform the PIC -Purchase Forecast Reliability Rate. - Machine availability rate.	Deploy product traceability -Reponse time - Coverage and traceability rate - Inventory anomaly rate	Investing in machine equipment Reliability of equipment - Use of equipment -Reliability rate	Personnel Manasement Stratery - Cost of training new recruits. - Number of hours of training	Integrate environment into strategy (green logistics) -Pollution rate -Environmental impact rate.	Analysis of the company and its environment. -Communication -Reactivity - Resistance to competition -Loss of market	Define the Downstream Logistics Stratery -Average transhipment duration CROSS-DOCKING	Conception of the return chain -Customer satisfaction rate -Number of return sites	Half-yearly activity report DG
Tactical level H=1 years P=3 months	Customer Forecast orders	Define the commercial forecast plan - Reliability rate of sales foreca - Customer service rate. - Cost of service rate.	Industrial material investment and training -Ability to standardize the product. -Investissement of means.	Define procurement policies - Quantity to be produced - Planning Reliability - Procurement flexibility Size of procurement lots.	Internal quality audit. - Supplier satisfaction rate. -- Respecting deadlines .	Production master plan - Production Capacity - Production Lead time - Compliance with the production plan	Quality control of finished Product - Customer satisfaction rate. Compliance with the deadline -Quality rate	Investment in maintenance equipment (training, machine purchase). - Evolution of the number of maintenance actions - Rate of accidents at work	Human Resources Planning -- Number of new jobs offered each year. - Number of workers. - Number of workers.	-Managing the environment at different stages of product manufacture - Compliance with environmental regulations - Cost per unit transported and per kilometre.	Establish a crisis management plan. - Number of people impacted. - Preventive measures -Adapted to crisis management	Distribution Requirements Plan (DRP) - Vehicle traceability. - Fill rate per vehicle. - Number of shipments -Delay rate	Manage customer complaints -Customer Chain Rate -Communication with costmer -Delay rate	Outstanding Claims, Delay Break Rates
Operational level H=2 weeks P = 1 Day	Customers informations.	Accept orders or follow up -Forecasting accuracy. - Reliability of market forecasts -Processing time - Cost of points of sale	Short-term intervention like emergencies... -Set-up tim Number of urgent orders	Order relaunch - Order rate for deliveries - Delivery performance of raw materials. - Orders followed - Average time to process a Purchase request. - Satisfaction rate of orders.	Verify product conformity -Compliance rate - Rate of compliant and non-compliant products per machine. -Non-compliance rate.	Start production - Manufacturing cycle time - Stock reduction -Productivity - Inventory turnover rate -Inventory turnover rate -Stopping rate	Controls and tests - Rate of compliant products - Scrap rate	Machine control and maintenance - Failure rate. - Machine utilization rate. - Rate of non-programmed machine stoppages. - Availability rate - maintainability rate.	Assign and manage human resources. - Number of redundancies per year - Cost of dismissal - Weekly absenteeism rate.	Eco-production -Rate of recyclabe products. - Percentage of recyclable materials that make up a product. - CO2 emissions in kilograms -Volume of waste generated per year.	Managing the way out of the crisis -Reduction of Financial losses -Crisis exit plan	Tour management -Optimization pf the tours - Warehouse fill rate. - Truck fill rate. - Traceability of transport packaging. -Transport cost	Delayed or blocked order analysis and processing -Cycle time for return of products. - Repayment or replacement periods.	Paiement And sales

Big Data, M2M, Energy Internet, Virtual Reality, Cyber Security, Machine Learning, RFID, Cyber Physical System
Digital Twin, Cloud Computing, IoT, Simulation, Collaborative Robots, Internet of services, IoS, Additive Manufacturing & 3D Printing, Artificial Intelligence

REFERENCES

Apics_Supply Chain Council, SCC and DCOR Overview, http://supplychain.org/2017-SCC-SCOR-Overview.pdf (Page consultée le 7 juin 2020).

ASLOG, l'Association Française de la Supply chain et de la Logistique, 2006, disponible sur http://www.aslog.org/fr.

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2007). Balanced scorecard. In Das Summa Summarum des Management (pp. 137-148). Gabler.

Baglin, G., Bruel, O. Kerbache, L., (2013) Management industriel et logistique : concevoir et piloter la supply chain. Economica, 2013.

Doumeingts, G., Vallespir, B., Zanettin, M. and Chen, D. (1992) GIM, GRAI Integrated Methodology - A methodology for Designing CIM systems, Version 1.0. Unnumbered Report, LAP/GRAI, University of Bordeaux I, France

Ducq, Y. (2007). Evaluation de la performance d'entreprise par les modèles – Habilitation to Supervise Research – University of Bordeaux – December 5th 2007.

Ducq Y., Vallespir B. (2005). Definition and aggregation of a Performance Measurement System in three aeronautical workshops using the ECOGRAI Method. International Journal of Production Planning and Control, vol. 16, n° 2, March 2005, pp 163-177

Gamache, S., Abdulnour, G., & Baril, C. (2019). Etude du potential de l'industrie 4.0 quand à la transformation de la

PME manufacturière Québécoise : Une analyse littéraire et expérimentale

Global Materials Management Operations Odette International Global Materials Management Operations Odette International https://www.odette.org/services/mmog

GLOBAL EVALOG, EVALOG D'ODETTE et MMOG (Materials Management Operations Guideline) de l'AIAG (Automotive Industry Action Group), 2004, available at http://www.galia.com/. (Page consultée, le 7 juin 2020).

Hermann, M., Pentek, T. et Otto, B. (2015) Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, Business Engineering Institute St. Gallen, Lukasstr. 4, CH-9008 St. Gallen. Accessed on 4 May 2016

Moeuf A. (2017) Identification des risques, opportunités et facteurs critiques de succés de l'industrie 4.0 pour la performance industrielle des PME. Thèse de doctorat. Paris Saclay.

Mohammadi, M., Mukhtar, M., & Malaysia, M. M. U. K. (2018). Comparison of supply chain process models based on service-oriented architecture. International Journal of Technology, 9(1), 35-45.

Morana, J. (2017). De la logistique globale (Supply Chain Management) à la logistique durable (Sustainable Supply Chain Management) : de l'importance de l'économique, de l'environnemental et du social/sociétal dans les chaînes logistiques actuelles (Doctoral dissertation).

Supply Chain Masters, référentiel SCM PME-PMI, version 2011, available at http://www.supplychain-masters.fr. (Page consultée le 7 juin 2020).

Value Chain Group, 2007. Value Reference Model (VRM) 3.0. Value Chain Group

Verdouw, C., 2010. Business Process Modelling in Demand-driven Agri-food Supply Chains: A Reference Framework. Wageningen UR Library: Wageningen University.

Uwe Dombrowski, Thomas Richter and Philipp Krenkel, (2017). Interdependencies of Industry 4.0 & Lean Production Systems - a use cases analysis", the 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: 10.1016/j.promfg.2017.07.217, Procedia Manufacturing 11 (2017), page 1061 – 106

13the International Conference on Modeling, Optimization and Simulation - MOSIM'20 – November 12-14, 2020- Agadir – Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

IMPROVEMENT OF SALES PREDICTION BY FITTED-TO-PRODUCT TIME-SERIES MODELS

Mohamed Sameh Belaid, Stéphane Lecoeuche, Anthony Fleury

IMT Lille-Douai, Douai, France
mohamed-sameh.belaid@imt-lille-douai.fr,
stephane.lecoeuche@imt-lille-douai.fr,
anthony.fleury@imt-lille-douai.fr

Baptiste Hervé

elm.leblanc, Bosch Group, Drancy, France
baptiste.herve@fr.bosch.com

ABSTRACT: *In this paper, we present an application of machine learning models with real-world data in order to enhance a company's performance. First, we present a brief literature review about the new trends in the field of supply chain predictive analytics and about the models used during this case study. We present then the industrial data-driven models to improve the overall supply chain performances in the scope of the Sales and Operations Planning (S&OP) process. We will present in our work, the considered assumptions and the methodology developed in order to implement a sales prediction engine, through several time series forecasting models. In this work, we use and mix classic time series models like ARIMA and Exponential Smoothing, and the recent Prophet algorithm. Finally, we present the results of the implementation of our methodology and the noted improvements on the predictions accuracy. Our discussions derive on how predicting customer demand for many products from different natures and on how the model parameters affected our sales forecasting process.*

KEYWORDS: *Industry 4.0, Supply Chain, Machine Learning techniques, Data Analytics, Time Series*

1 INTRODUCTION

In an economic world characterized by increased competition, companies are still seeking to strengthen their competitiveness in order to gain a foothold in the market. To achieve this goal, several areas of development are considered, among which, the improvement of the supply chain through exploiting emerging data-driven techniques.

Our paper is related to an industrial application seeking for improving the industrial performance of the company elm.leblanc (subsidiary of Bosch Group and a French market leader in the heating systems industry). We aim to implement innovative methods around data-driven modelling, which will ensure better management and efficiency of the supply chain.

In order to reduce storage costs and effectively plan the company production, we realized investigations and diagnostics over the Supply Chain stockholders. A common point reported is the poor quality of sales forecasts as it is the first step in the Sales & Operations Planning process (will be discussed later) and the conductive phase of the rest of the Supply Chain.

The sales prediction task represents multiple complexities due to the influence of internal and external environments (Sun *et al.*, 2008) such as the diversity of the products, the several variables that could affect the sales and the various non-linear patterns that can be represented in the data. Added to that, a huge data volumes are generated leading to difficulties in manually making accuracy forecasts. In order to raise these challenges, machine-learning techniques are considered as interesting approaches and suitable methods to deal with such data (Cheriyan *et al.*, 2019) through extracting useful information and insights. To respond to this industrial need, we investigate the state-of-the-art data-driven models and exploit them to implement a sales prediction engine.

Our proposition consists in a scalable methodology which aims to improve sales forecasting through selecting the accurate model for each product based on several assumptions. This is motivated by the fact that products have specific sales signatures and trends. These works illustrate an industrial experience of implementing a machine learning approach with real-world data. The purpose is to reduce costs, enhance planning processes, improve inventory management and optimize the overall supply chain to satisfy customer demand.

In this paper, we present a brief literature review about the new trends for supply chain improvements coupled with the S&OP process and its relation with these trends. We also present a literature review about different models used for time series forecasting. Then, we will introduce the framework application and the followed methodology in order to implement an accurate prediction engine for a variety of products and sales patterns. Finally, we discuss the results and experiments and our future intended works.

2 SUPPLY CHAIN PREDICTIVE ANALYTICS

2.1 Sales & Operations Planning (S&OP)

The S&OP process is an integral process that aims to balance supply and demand, and to make the link between the company's strategic and its operational plans (Thome *et al.*, 2012a). These objectives are achievable through the deployment of a vertical alignment between the planning levels (strategic, tactical, operational) (Thome *et al.*, 2012b) as well as a horizontal alignment between the different functions of the company or inter-functional alignment. This process typically involves five steps as shown in the following figure 1.

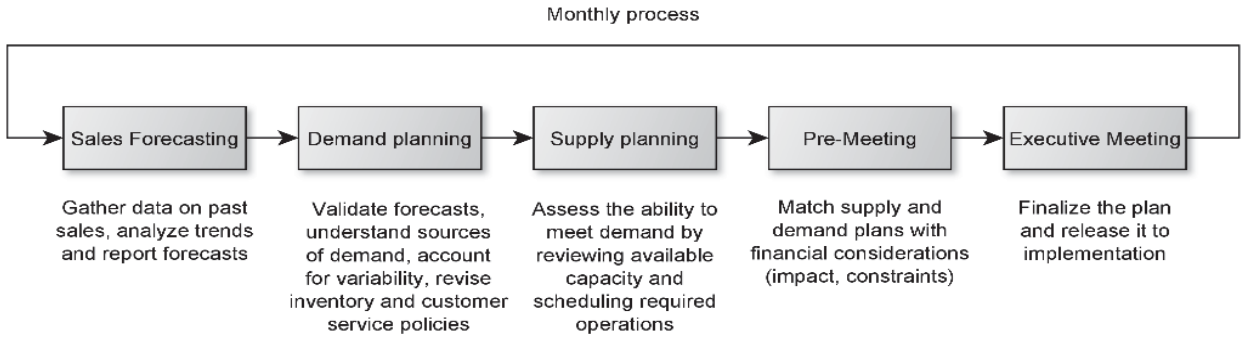


Figure 1: The S&OP process

According to (Wallace and Stahl, 2008), the demand-planning step can be the most challenging within the five steps of the S&OP for many companies. This step is preceded (and strongly influenced) by the demand forecasting, in which statistical techniques are used. (Lapide, 2011) stresses the importance of the demand forecasts for the smooth running of the S&OP process since the plans are driven by it. (Wang *et al.*, 2016) affirm that there are two widely quantitative techniques used in supply chain analytics which are "times-series analysis and forecasting" and "regression analysis". The first aims to determine existing patterns in historical data and predicts future events based on that, and the second intends to understand relationships and causality between variables. Beyond these classic methods, several models are developed by associating other machine learning techniques like Artificial Neural Networks. The rest of the paper is devoted to that objective, requesting the use of efficient time series modelling techniques.

2.2 New trends and field of research

Recent works on Supply Chain Management (SCM) field are interested in the integration of new technologies derived from Data science such as big data and predictive analytics. These trends bring out new opportunities for professionals. (Waller, Fawcett and Beane, 2013) suggest different definitions and concepts in this purpose, namely, SCM Predictive analytics and SCM data science. They are defined as the application of advanced analytic techniques including data mining, statistical analyses and predictive analytics on big datasets (Tiwari, Wee and Daryanto, 2018). They bring more possibilities to create data-driven decision-making tools in order to improve supply chain profitability.

In this context, our works focus on a new contribution of SCM predictive analytics in the objective to improve the operation planning decision process by the means of a better understanding and a better prediction of the demand. The next section gives an overview of models, used for predictive analysis and time series forecasting.

3 TIME SERIES FORECASTING MODELS

Time series, is a sequence of data points representing the evolution of a quantity over time, such as product sales. This area has attracted the attention of researchers over last few decades due to its different applications, especially in economy, finance, retail and industry. Time series forecasting fits under supervised machine learning problems and specifically regression ones. It aims to determine the way in which time series are changing by describing the relationship between its historical data points and/or other explanatory variables through a mathematical model. Several models were developed in the literature in order to model and predict time series. We present hereafter the models that were studied and used in our approach.

3.1 ARIMA and Seasonal ARIMA

ARIMA, which stands for Autoregressive Integrated Moving Average, is a linear forecasting model mainly used for stationary time series prediction (Panigrahi and Behera, 2017) .i.e. time series with time independent properties such as mean and variance. It is a combination of autoregressive (AR) and moving average (MA) models, with a term of differencing (I) used to overcome the non-stationarity of some time series. ARIMA is characterized by (p,d,q) parameters which are respectively, the number of lag observations, the size of moving average window and the number of times to differentiate the time series in order to make it stationary. ARIMA can be expressed (Hyndman, R.J. Athanasopoulos, 2019) as the following equation (1):

$$(1 - \varphi_1 B - \cdots - \varphi_p B^p)(1 - B)^d y_t = c + (1 + \theta_1 B + \cdots + \theta_q B^q)\varepsilon_t \quad (1)$$

Where y_t is the data values at time *t*, ε_t an identically distributed random error with a null mean and a constant variance, φ_p and θ_q are respectively the Auto Regression and the Moving Average coefficients. A backshift operator *B* defined as $B^d y_t = y_{t-d}$.

The most important phase in the process of forecasting using ARIMA model is identifying the best parameters that lead to well fit the data and provide forecasts with a good accuracy. In the literature, different methods are proposed to find these parameters. The most popular way is to follow the Box-Jenkins methodology (BOX *et al.*, 2016). It relies on an iterative approach of identifying a model, estimate its parameters and diagnostic checking to determine the best model. The choice of models is generally based on ACF (autocorrelation function), PACF (partial autocorrelation function), AIC (Akaike Information Criterion) or BIC (Bayesian Information Criterion) calculation. Another method is to simply try all possible values of the parameters through a grid search and then compare them by a metric like AIC. A more intelligent and automated method is the Hyndman-Khandakar algorithm described in (Robin Hyndman *et al.*, 2008). It is an automated process of best order identification through combining unit root tests, minimization of the AICc (corrected AIC) and MLE (Maximum Likelihood Estimation) (Hyndman, R.J. Athanasopoulos, 2019).

In the Seasonal ARIMA extension, additionally to the (p,d,q) ARIMA orders, (P,D,Q,m) orders represents the seasonal part of the model. "P" represents the seasonal autoregressive order, "Q" represents the seasonal moving average order, "D" is the seasonal difference order and "m" is the seasonal period of the time. SARIMA can be expressed through the following equation (2):

$$\Phi_p(B^m)\,\varphi_p(B)(1 - B)^d\,(1 - B^m)^D\,y_t = \Theta_Q(B^m)\,\theta_q(L)\varepsilon_t \quad (2)$$

Where Φ of order *P* and Θ of order *Q* are respectively the seasonal Auto-Regression and the seasonal Moving Average coefficients, and B the backshift operator. Comparing to ARIMA model, SARIMA(p,d,q)(P,D,Q,m) has more possible combinations, and in order to fit the best model, the parameters can be chosen through the same methods presented before for ARIMA.

3.2 Exponential Smoothing

Exponential smoothing models are classical time series forecasting models widely used in business and industry (De Gooijer and Hyndman, 2006). They include 24 different variants presented in (Hyndman *et al.*, 2002). Simple exponential smoothing consists in calculating future values based on weighted averages of past values with an exponential decreasing of the weights. It is characterized by an α parameter representing a forgetting factor (Hyndman, R.J. Athanasopoulos, 2019) i.e. the importance that will be given to the last observation. It is usually used with data representing no trend and no seasonality patterns, to predict the level i.e. the average value of the series.

This model was improved later with (Holt, 2004) works, adding the capacity of detecting the trend component in the time series through adding another component with a second parameter β. This is known as double exponential smoothing model with constant trend. The works of (Gardner, 1985), (Taylor, 2003) proposed to model a "damped" trend through introducing a damping parameter ϕ able to capture a constant long-term evolution, which forces the trend to converge to a constant value in the long-term future.

Through adding a seasonal component, the triple exponential smoothing comes with two variants: additive and multiple seasonality components (Hyndman, R.J. Athanasopoulos, 2019). The seasonal effect is determined through an exponential weighting method with a learning rate γ. (Hyndman, R.J. Athanasopoulos, 2019) presented in their book the different taxonomies and formulas of level, slope and seasonality calculation. The following equation (3) presents an example of an exponential smoothing model with additive trend and seasonality:

$$\hat{y}_{t+h|t} = l_t + hb_t + s_{t+h-m(k+1)} \quad (3)$$

Where $\hat{y}_t$, l_t, and s_t represent respectively the predicted values, the level, the slope and the seasonal component of the series at time *t*. *h* denotes the number of predicted periods and *k* is the integer part of $\frac{h-1}{m}$. *m* is the frequency of seasonality. The choice of the best parameters (α, β, ϕ, γ) is done by the analyst or fitted automatically by an optimization tool. In the most of the cases, the selection is based on maximizing of the likelihood i.e. the probability of the data arising from the specified.

3.3 Prophet

Recently, (Taylor and Letham, 2018) published a new forecasting model based on the Generalized Additive Models (GAM) (Hastie, Tibshirani and Friedman, 2008). GAMs are recently used in the data science field (LARSEN, 2015). They represent an interesting model structure thanks to their interpretability, flexibility and automation with the predictors' capacity to model different behaviours. Based on this approach, Prophet model was proposed by the research team of Facebook in order

to predict time series. The model is composed from three main components: trend, seasonality and holidays as presented in the equation (4).

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon_t \qquad (4)$$

The trend $g(t)$ can represent a nonlinear behaviour by the mean of a piecewise logistic growth model, and a linear one through a piecewise linear model. An interesting feature in trend modelling is the "change points" aspect where the user can specify special date points where trend may change according to his knowledge on the time series. The seasonality aspect $s(t)$ is modelled through a standard Fourier series that can handle yearly, monthly and weekly seasonality. The Prophet model can handle additive or multiplicative seasonality in the time series. The third component $h(t)$ represents holidays or special events modelling.

3.4 Machine learning approach

Several works are presented in the literature on solving sales prediction task with machine learning techniques. In (Cheriyan *et al.*, 2019), authors evaluate the performances of three models: generalized linear model, decision tree and gradient boosted tree, and select the best algorithm to make sales prediction for an e-fashion store. In the same idea, (Gumani *et al.*, 2017) compare various machine learning models namely XGBoost, Support Vector Machines (SVM) and Regressive Neural Network (ARNN) with ARIMA, hybrid methods and STL decomposition based methods in order to figure out the most accurate model to forecast drug store company sales. They concluded that non-linear models such SVM and XGBoost performed better than ARIMA, however, hybrid models gave better performances than individual ones. Added to that, STL decomposition based methods gave the best results in terms of prediction accuracy.

An interesting approach has drawn attention in the recent years by combining multiple machine learning models to make final predictions. (Punam, Pamula and Jain, 2019) present in their works a two-level model for sales forecasting. First, predictions are made individually by the different models such as linear regression and support vector regression (SVR). Then, these predictions are combined using another model such as cubist to make more accurate final predictions. In the same idea, (Pavlyshenko, 2019) implement a multilevel model composed of several machine learning models, and the final predictions are generated through summing weighted results of the last level.

3.5 Other approaches

Other interesting approaches also exist in the state of the art and has recently emerged. Long Short-term Memory (LSTM) represents a successful application of the Artificial neural networks (ANN) for time series forecasting (Pankaj Malhotra *et al.*, 2015). However these models present some inconvenient especially their complexity and over-parameterization (De Gooijer and Hyndman, 2006). In addition, generally, they need very long time series to produce good forecasts, so that for short-time series, classic methods perform better.

Another approach emerged recently through the use of hybrid methods through combining linear and nonlinear models such as ARIMA with ANN in (Zhang, 2003) works, or combining Exponential Smoothing with ANN models (Panigrahi and Behera, 2017).

Several works in the literature have proved that classic methods such as ARIMA and Exponential Smoothing outperform ANN (Gorr, Nagin and Szczypula, 1994). However, others have demonstrated that ANN are more accurate in terms of forecasting (Aras and Kocakoç, 2016). Actually, these results depend on the application, the type, and the length of the time series in question. For our case, we are treating univariate noisy time series that are more or less short (60 data points at maximum). Therefore, ANN will not deliver accurate results as stated due to the lack of long-time series data. Added to that, our data may represent linear behaviour that can be modelled with ARIMA and simple or double exponential smoothing, and nonlinear patterns that can be modelled through Triple exponential smoothing or Prophet. Based on these facts, we decided to use classical models to implement a prediction engine for all our time series.

4 PROPOSED METHODOLOGY

4.1 Data preparation

Our first step is the data collection. It is represented by the sales information such as the quantities, products, type of customers, products family, etc. from 2015 until the end of 2019. Data are gathered from different sources namely the enterprise resource planning system, marketing department and sales department. These data are merged together and aggregated to construct time series representing monthly quantities per product. Then, the whole dataset of time series is fed as input to the algorithms as explained later in the methodology.

4.2 Assumptions

Our time series represent sales quantities of several products per month. Some products present seasonal patterns, however, others do not and these products belong to different families, which lead to different nature of time series. Another challenge is that some products have been recently launched, so with short time series and others that are older with longer time series.

As (Hyndman and Kostenko, 2007) explained in their article, the use of seasonal models requires a minimum number of observations on the data since they should be at least larger than the number of parameters by one. They highlight that the use of Holt-Winters method for example, requires at least 17 observations for monthly data, and for SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 at least 16 observations. Additionally, the randomness and variations also require more data to fully capture the patterns in data. Based on these statements, we decided to separate our data into two groups: short time series with fewer than 24 observations to be forecasted with non-seasonal models, and long-time series with more than 24 observations can be forecasted using seasonal models.

As mentioned in (Hyndman, R.J. Athanasopoulos, 2019), exponential smoothing methods with multiplicative trend tend to produce poor forecasts quality, however, (McKenzie and Gardner, 2010) argue that a damped multiplicative trend has performed well in numerous empirical studies. In addition, during experiments we found that for some time series a multiplicative trend produce better forecasts than other models, so we decided to keep some multiplicative trend models in the prediction engine.

The proposed methodology helps to forecast several products with different models, and as was expected, algorithms do not behave in the same way for all products. The modelling stage consists in fitting the best model for each product, model that outperforms the others. Based on these findings and assumptions, the following methodology was developed to implement the forecasting engine for the different products.

4.3 Methodology

The following diagram (figure 2) represents our global forecasting methodology:

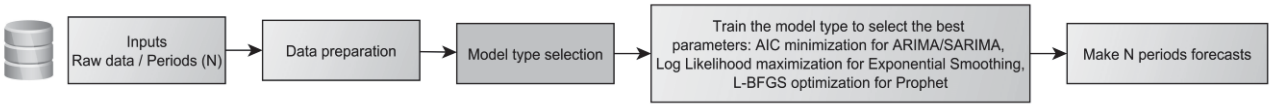


Figure 2: Global forecasting methodology

After cleaning and preparing the data, we select the most suitable model structure and fit it to the data in order to identify the best parameters. These latter are selected based on different measures for each model type such as AIC minimization for ARIMA and SARIMA models. Then, the trained model with optimized parameters will be used to forecast the N periods. The most important step is the model type selection that will be explained hereafter.

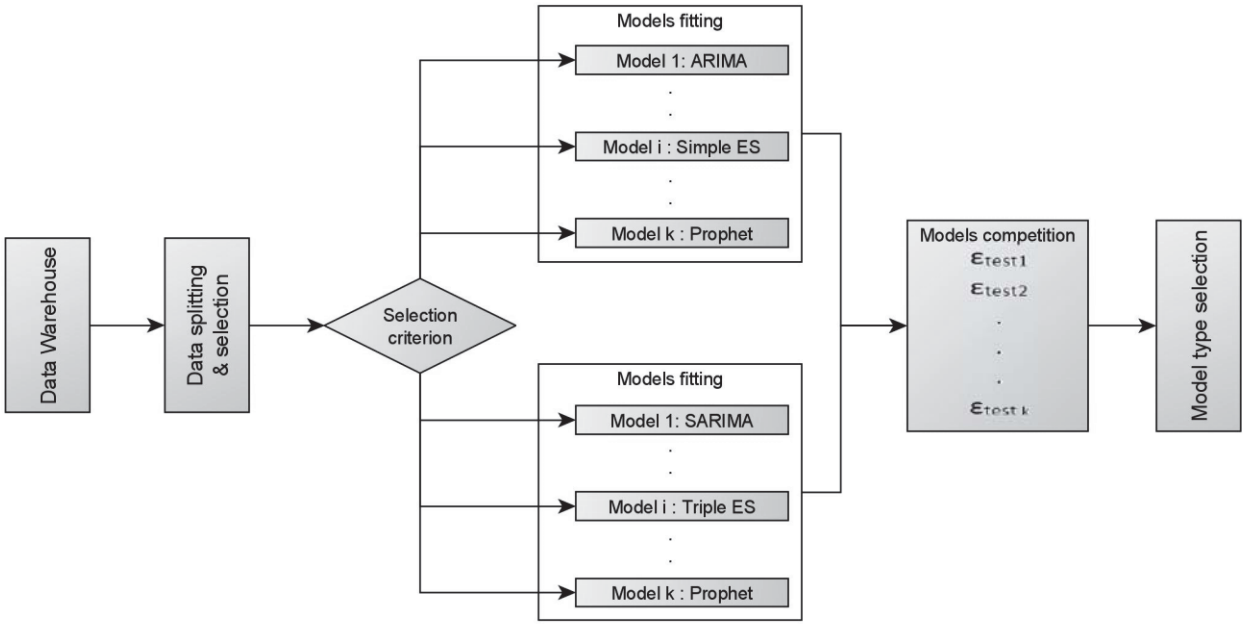


Figure 3: Model type selection methodology

Figure 3 explains our methodology for model type selection. The first phase corresponds to data splitting and preparation. As mentioned before, based on each time series observations, the appropriate group of models will be fitted on the data.

The second stage consists in the estimation of the models. For each time series, a variety of different model structures are fitted using a complete training and validation procedure. For model type, the best parameters are estimated. During the model fitting, the selection of the best ARIMA and SARIMA parameters is based on AIC measure. For exponential smoothing models, the selection of different parameters of each model is based on likelihood maximization as mentioned in the state of the art. Moreover, for Prophet, parameters tuning is based on the L-BFGS optimization.

For the next stage, the trained models are in competition during the testing phase in order to choose the best model structure with respect to the following equation:

$$Win_{model} = argmin_k(\varepsilon_{test\ k}) \quad (5)$$

The error metric is used to identify the winning model. In our model selection, we used the Root Mean Squared Error (RMSE) (Chai and Draxler, 2014) in order to select the best model for a given time series. RMSE is defined as:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

Where are the observed values, the predicted values and n the number of observations.

The choice of the best model type for each product depends, actually, on the number of periods given by the user to be forecasted. In fact, if the user asks for one-month (one-step) forecasting, that means that we should choose the best model for short-term prediction. In this case, the selection procedure is done using the walk-forward (back testing) technique: we fit a model on a training data until the period t and we predict the t+1 period. Then, the predicted t+1 period will be compared to the real t+1 value from the testing set to save the error. Later, we add this real value to the training dataset and refit the model. We continue this process until we finish all the test dataset. In the case where the user asks for mid or long-term forecasts, the test is done directly over-all the test set. In both cases, the model structure with the minimal RMSE will be chosen to make predictions.

The implementation of the different algorithms is done in Python using stats models library for Exponential Smoothing models, pmdarima library for ARIMA and SARIMA models and the fbprophet package for Prophet model.

5 EXPERIMENTS OF INDUSTRIAL USE CASE

5.1 Framework and experiments

These works are conducted within elm.leblanc company in their Research and Development department. To perform different experiments, we gathered sales data represented by time series of all components, products and spare parts from data warehouse. In order to simplify the context application, we decided to focus our works on a limited perimeter represented by the top sold accessories and by the wall boilers products assembled in one plant, for the French market. These boilers represents 80% of the sales, and bring the most profitability to the company. The sales are composed of three product types among them there are different product families and among every family several products considered as time series. To make forecasts, the data is split in training and testing datasets using 90% to train models and 10% to test them. In our use case study, we have monthly time series data of different natures (stationary or not) and lengths (60 months for old products to 16 months for recent ones).

The approach presented in 4 has been applied on the 316 different products using real-world data to make midterm (3 months) and short-term (1 month) predictions. Before presenting the impact of these experiments, we are interested to see how products are gathered by model type in order to more understand and categorize our time series based on forecasting models. This identification can lead to create a sort of product groups, study the similarities presented in these time series and obtain a better understanding on the product sales in order to improve forecasts.

For midterm forecasting, the table below presents the repartition of the products modelled by each model.

Models	Modelled products
Prophet	40 products
ARIMA/SARIMA	43 products
Exponential Smoothing	233 products

Table 1: Number of products for each model

We found that Prophet model was selected for 40 products which are time series representing almost a similar pattern. Figure 4 presents examples of the sales of these products.

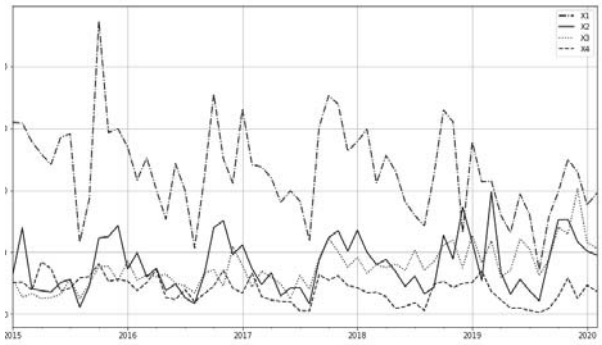


Figure 4: Examples of products modelled by Prophet.

Most of the products represent a recognizable seasonal behaviour presented by decreasing sales in August from each year and an important increase on the quantities in the end and the beginning of each year. Prophet succeeded in capturing the variability on these products better than other models. Therefore, this example supports our methodology in choosing suitable model for each time series and not to apply one model for all products.
The ARIMA model was used for 24 products representing different behaviours but we found that some products having a special behaviour is well captured by ARIMA as presented in the next figure 5.

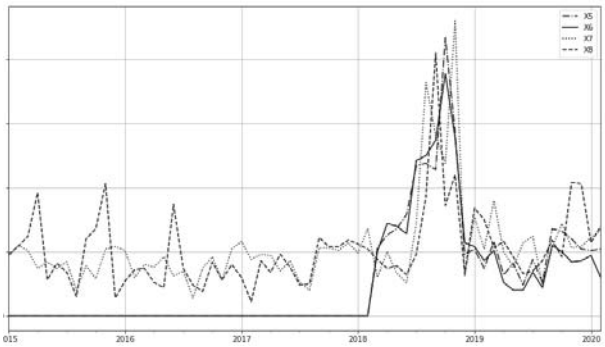


Figure 5: Examples of captured behaviour by ARIMA

We notice that this type of product presenting an important increase on sales quantities in the end of 2018 was well captured by ARIMA than by other models. Also, these time series do not represent strong seasonal patterns which justify why ARIMA performed over other seasonal models.

The most used model type were Exponential Smoothing (ES) techniques, they were selected for 233 time series, with different components. 12 Exponential Smoothing models competed to make forecasts with multitude combinations. Table 2 summarizes the repartition of the products by model.

		Seasonality		
		None	*Additive*	*Multiplicative*
Trend	*None*	-	47 pdts	-
	Additive	81 pdts	50 pdts	10 pdts
	Multiplicative	24 pdts	9 pdts	12 pdts

Table 2: Number of products for each ES model

We noticed that a model with additive trend (damped or not) was the most selected over other ES models and other models types with 141 products, which explain that most of the products have a slowly increasing trend. Some products do not present a trend, so a pure seasonal model won the competition. However, others with important trend are modelled through a multiplicative trend and a seasonal component. As we can also see, many products are modelled through an additive seasonal component, which also explains that from year to another, the seasonal pattern do not increase rapidly.

Comparing these products to others modelled by Prophet and ARIMA/SARIMA, we notice some differences between time series. Those with a clear trend but little variability were almost modelled with a double exponential smoothing. Other times series representing an important seasonality but no trend pattern was almost modelled with a simple exponential smoothing model. The figure below represents examples of products modelled with a double exponential smoothing with a multiplicative damped trend.

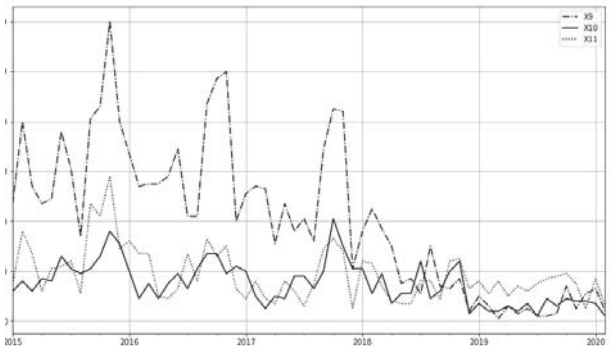


Figure 6: Examples of products with multiplicative damped trend

Through these examples, we can explain why a model can be used for a time series and not for another, which justify the importance of using several models in our sales forecasting methodology.

For short-term predictions, we applied this methodology also to predict 3 months, one month each time. The model type selection differs from month to month and we do not find the same model taxonomy as for the mid-term predictions. This fact also justifies, our interests on using different models since while we evolve on time,

we get more data and the time series patterns and behaviours can change according to external factors. Therefore, this methodology permits this prediction engine to be scalable over time.

An interesting aspect also noted is that products that belong to the same product family are modelled with different methods, which prove their different natures and the necessity to be treated separately.

The next paragraph will present the impact on company sales forecasting after implementing and running the algorithms

5.2 Methodology Impact on company sales forecasting

In the following graph (figure 7), we present a sample of different products histogram of sales versus models forecasts versus sales department forecasts for the last trimester of 2019, and then we will present an example of the results on the top four sold boilers.
We note first that the actual method used in the sales department for forecasting is done manually and it is based on the intuition and the customers' demands.

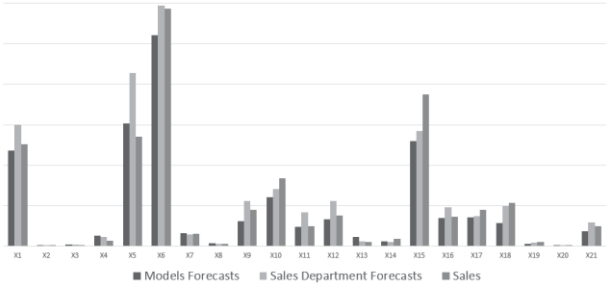


Figure 7: Sales VS Models Forecasts VS Sales Department Forecasts.

As we can notice, for several products models outperform the actual forecasts especially for products with important quantities. However, for some products models were less powerful. These products are generally recently launched, so with short time series.

In the following table 3, we present a sample of results on the top four sold boilers and we present the forecasting errors of the models and the sales department. In the last row, we present the total of absolute errors over all boilers for both horizons also.

	Last trimester 2019		A month each time for last 3 months of 2019	
Products	**Models Error**	**Sales Dpt Error**	**Models Error**	**Sales Dpt Error**
X5	842	1572	1076	1681
X6	871	991	1038	1449
X15	1148	910	1083	641
X1	154	489	123	600
All products	5588	6258	5852	6759

Table 3: Forecasts errors comparison for short and midterm.

We also studied the 4 boilers that were the most erroneously forecasted by the sales department and, surprisingly, they were the same products that are the most sold. As we can understand from the tables, our methodology outperformed sales department in 3 products in both horizons and sometimes with much less error. Models were less good on one product which presented huge variability over years.

As we can see, for many products, we could have an important improvement especially that among them there are "high runner" products, which means important quantities and then important cost saving specially in storage. However, the models did not well performed for some other products and this especially due to either lack of data for the recently launched ones, or for unpredictable events such as unexpected shutdowns or other external factors that may influence the sales.

The table mentioned above is an example of the results that we had and it does not represent the whole products studied. However, the overall noted improvements will be discussed in the next paragraph.

The overall improvement rate for all products in the midterm is 12 % compared to actual forecasts made by sales department. Moreover, for the short-term forecasting, we estimate an improvement rate by 15 % for all products. One can say that this represents a small improvement but these are significant improvements compared to the volume and the value of the products and the storage costs. More, these results are based only on historical data, with some lacks of data and without taking in consideration any other external or internal data. In this work, we considered to avoid the use of external data. As an example, commercials are in a direct contact with customers and can bring explanatory factors. In its industrial application, we plan to integrate this additional information in our proposed methodology in order to improve our models and our forecasts. In addition, the presented work will be improved through multiple ways that will be discussed in the perspective section.

From a managerial point of view, the sales forecasting tool has improved the efficiency of the S&OP process through enhancing the demand-planning step by bringing an additional information captured from the data. It provides a solid base to conduct discussions in this most challenging step of the process. An accurate demand plan will facilitate the development of production and replenishment planning, and the control of inventory costs.

6 CONCLUSION & PERSPECTIVES

In this paper, we made a literature review on supply chain analytics field and the potential applications of emerging technologies such as machine learning and data mining to improve supply chain processes. A specific process on which we have focused is the Sales & Operations Planning. We then proposed a way to improve the implementation of such process through the enhancing the sales prediction step. In this purpose, we studied several models used for time series forecasting and we proposed a new methodology to select the best structure model according to the type of product sales.

This is justified by the fact that even the products could be seen as similar, in a wide product catalogue, each product has specificity in terms of sales. We designed a prediction engine following the developed methodology in order to make forecasts for several products with different natures. The results seem to be very encouraging since we note a good progress in terms of global prediction accuracy compared to the existing methods. In order to reduce the scope, we performed the different experiments on specific products. These preliminary results represent a gain of performance and a success for the company but the methodology has to be extended to other products and components. This represents a challenge since there have dozens of thousands of time series to forecast.

These preliminary results can be improved through different ways. In these works, the main limitation is related to the selection of a unique "best model". As improvement, a decision procedure could be added in order to compare scores for several models. We can use a cooperation/competition of model results in order to define clusters of products that have similar sales model structures, and to provide forecasts with more accuracy. In addition, the data granularity can be increased through using weekly data instead of monthly data then aggregate the results. This may enlarge the time series length, which let us use models that are more sophisticated. Also, other external factors that may influence the sales of the products have to be studied and then multivariate time series models could be requested.

REFERENCES

Aras, S. and Kocakoç, T. D. (2016) 'A new model selection strategy in time series forecasting with artificial neural networks: IHTS', *Neurocomputing*. Elsevier, 174, pp. 974–987.

BOX, G. E. P. *et al.* (2016) *TIME SERIES ANALYSIS : Forecasting and Control*.

Chai, T. and Draxler, R. R. (2014) 'Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?', *Geoscientific Model Development Discussions*. Copernicus GmbH, 7(1), pp. 1525–1534.

Cheriyan, S. *et al.* (2019) 'Intelligent Sales Prediction Using Machine Learning Techniques', in *Proceedings - 2018 International Conference on Computing, Electronics and Communications Engineering, iCCECE 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

Gardner, E. S. (1985) 'Exponential smoothing: The state of the art', *Journal of Forecasting*, 4(1), pp. 1–28.

De Gooijer, J. G. and Hyndman, R. J. (2006) '25 years of time series forecasting', *International Journal of Forecasting*. Elsevier, 22(3), pp. 443–473.

Gorr, W. L., Nagin, D. and Szczypula, J. (1994) 'Comparative study of artificial neural network and statistical models for predicting student grade point averages', *International Journal of Forecasting*. Elsevier, 10(1), pp. 17–34.

Gumani, M. *et al.* (2017) 'Forecasting of sales by using fusion of machine learning techniques', in *2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation, ICDMAI 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 93–101.

Hastie, T., Tibshirani, R. and Friedman, J. (2008) *The Elements of Statistical Learning Data*.

Holt, C. C. (2004) 'Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages', *International Journal of Forecasting*. Elsevier, 20(1), pp. 5–10.

Hyndman, R.J. Athanasopoulos, G. (2019) *Forecasting: principles and practice, 3rd edition*, *OTexts: Melbourne, Australia.*

Hyndman, R. J. *et al.* (2002) 'A state space framework for automatic forecasting using exponential smoothing methods', *International Journal of Forecasting*. Elsevier, 18(3), pp. 439–454.

Hyndman, R. J. and Kostenko, A. V. (2007) 'Minimum sample size requirements for seasonal forecasting models'.

Lapide, L. (2011) 'S&OP: The Linchpin Planning Process', *Supply Chain Management Review*.

LARSEN, K. (2015) *GAM: The Predictive Modeling Silver Bullet*.

McKenzie, E. and Gardner, E. S. (2010) 'Damped trend exponential smoothing: A modelling viewpoint', *International Journal of Forecasting*. Elsevier, 26(4), pp. 661–665.

Panigrahi, S. and Behera, H. S. (2017) 'A hybrid ETS–ANN model for time series forecasting', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Elsevier Ltd, 66, pp. 49–59.

Pankaj Malhotra *et al.* (2015) 'Long Short Term Memory Networks for Anomaly Detection in Time Series', in *European Symposium on Artificial Neural Networks*.

Pavlyshenko, B. (2019) 'Machine-Learning Models for Sales Time Series Forecasting', *Data*. MDPI AG, 4(1), p. 15.

Punam, K., Pamula, R. and Jain, P. K. (2019) 'A two-level statistical model for big mart sales prediction', in *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies, GUCON 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 617–620.

Robin Hyndman *et al.* (2008) *Forecasting with Exponential Smoothing - The State Space Approach*. 1st edn. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Sun, Z. L. *et al.* (2008) 'Sales forecasting using extreme learning machine with applications in fashion retailing', *Decision Support Systems*. North-Holland, 46(1), pp. 411–419.

Taylor, J. W. (2003) 'Exponential smoothing with a damped multiplicative trend', *International Journal of Forecasting*. Elsevier, 19(4), pp. 715–725.

Taylor, S. J. and Letham, B. (2018) 'Forecasting at Scale', *American Statistician*. American Statistical Association, 72(1), pp. 37–45.

Thome, A. M. T. *et al.* (2012a) 'Sales and operations planning : A research synthesis', *Int . J . Production Economics*, 138, pp. 1–13.

Thome, A. M. T. *et al.* (2012b) 'Sales and operations planning and the firm performance', *International Journal of Productivity and Performance Management*.

Tiwari, S., Wee, H. M. and Daryanto, Y. (2018) 'Big data analytics in supply chain management between 2010 and 2016 : Insights to industries', *Computers & Industrial Engineering*. Elsevier, 115(October 2017), pp. 319–330.

Wallace, B. T. and Stahl, B. (2008) 'The Demand Planning Process in Executive S&OP', *The Journal of Business Forecasting*, pp. 19–24.

Waller, M. A., Fawcett, S. E. and Beane, B. (2013) 'Click Here for a Data Scientist : Big Data , Predictive Analytics , and Theory Development in the Era of a Maker Movement Supply', *Journal of Business Logistics*, 34(4), pp. 249–252.

Wang, G. *et al.* (2016) 'Big data analytics in logistics and supply chain management : Certain investigations for research and applications', *Intern. Journal of Production Economics*. Elsevier, 176, pp. 98–110.

Zhang, G. P. (2003) 'Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model', *Neurocomputing*. Elsevier, 50, pp. 159–175.

13th *International Conference on Modeling, Optimization and Simuation* - MOSIM*'20 - November 12-14, 2020*
Agadir - Morocco "New advances and challenges for sustainable and smart industries"

FVMEARA : A NEW SYSTEMATIC APPROACH for SECURITY and SAFETY RISK Co-ASSESMENT BASED ON ICVSS METHODOLOGY

R. CHEMALI, B. CONRARD, M. BAYART

CRIStAL (Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille) University of Lille
Lille, France
riad.chemali@univ-lille.fr, Blaise.Conrard@polytech-lille.fr, Mireille.Bayart@univ-lille.fr

ABSTRACT : *The nowadays CPPS (Cyber Physical Production System) depends essentially on Operational Technologies (OTs) that have been acquired from a wide range of Information Technologies (ITs). In order to guarantee the CPPSs requirements, several of ITs have been adjusted or adapted. As a result, new issues appeared, in the design of this production system, such as the integration of safety, security and vulnerability risks. The greater part of CPPSs vulnerabilities have generally not been considered in the design phase. However, this dependence on ITs makes CPPSs increasingly vulnerable to cyber-attacks and security threats, which affect their global performance. The focus of this research is to address the cyber security challenges that these systems have to cope. It discusses the features of the CPPSs threat environment and align safety and security risk analysis. In fact, the first problem in security risk analyzes is determining the likelihood of the cyber-attacks. The use likelihood in security analysis is not practical and sometimes does not make sense. Therefore, this prevents the research community from using a panoply of methods that exist in the field of safety because they are based on the use of probabilities. In this paper it is introduced a new vulnerability scoring system for industrial systems, called ICVSS. The proposed approach based on the calculation of variety of metrics distributed into two groups of metrics inherited from the classical CVSS metrics. The ICVSS not only make possible to assess the vulnerability and to ease the communication between the safety and security teams, but also it is a good alternative to replace the likelihood in order to be able to use these safety methods. Next, a new approach to co-analysis and co-assessment of safety and security called FVMEARA (Failure and Vulnerability Modes, and Effect Analysis and Risk Assessment) is presented. Actually, FVMEARA is a use case that shows the effectiveness of our methodology in which we have been able to reuse the FMEA method, known as the most widely used in the field of safety, to carry out a co-analysis of hazards and threats and to assess their risks. Even more, the proposed solution complies with the standards IEC 60812 for safety and the standard IEC 62443 for security.*

KEYWORDS : *Cybersecurity, Risk assessment, Design, Risk management, CVSS, ICS, Cyber-Physical Production System, Vulnerability, ISA/IEC 62443, IEC 60812, FMEA.*

1 Introduction

Today, the emergence of the Industry 4.0 and the smart factories amplify the needs of communication systems and their cooperation with each other, but also with humans, to decentralize decision-making with a distribution of information in each of the entities making up the global system. In relation to smart factories, a cyber-physical production system (CPPS) can be created when multiple cyber-physical systems are connected and interact with one another Reinhart et al. (2013), Scholz-Reiter et al. (2013), Monostori et al. (2016). Moreover, there is a strong need to integrate numerous systems and to share data via a cloud into CPPSs. This integration has created many challenges for the safety and security research community. In fact, safety and security play a vital role as well as in the design phase than in the operational phase (Banerjee et al. (2011); Pièrre-Cambacédès and Bouissou (2013)). The purpose of safety is to protect the System Under Consideration (SUC) from accidental faults in order to avoid hazards. However, the purpose of security is to protect the SUC from intentional faults, attacks, and malicious activities in order to avoid threats. Safety and security are very important when hazards or threats can cause loss of life or environmental loss. However, safety and security risk assessment must be aligned. A weak collaboration between safety and security activities could produce weakly or partially protected systems (Sabaliauskaite and Mathur (2015)) . In fact,

security countermeasures influence and sometimes even weaken safety. Similarly, safety countermeasures could impact the security (Pièrre-Cambacédès and Bouissou (2010)). Aligning safety and security risk assessment enables to avoid a number of problems that affect the CPPS either in the design phase or in the operational phase. For many years, the research community addressed safety and security separately. The International Electrotechnical Commission (IEC) has proposed the standard IEC 60812 for instrumented systems safety and the standard ISA/IEC 62443 for ICS security (Sabaliauskaite and Mathur (2015)). International Society of Automation (ISA) has gone one step further and formed a working group called Work-Group 7 to align safety and security and to address the common issues.

In this paper it is introduced a new vulnerability scoring system for industrial systems, called ICVSS. The proposed approach based on the calculation of variety of metrics distributed into two groups of metrics inherited from the classical CVSS metrics. These metrics allow refining and adapt score results for CPPS. Thereafter, a new methodology to co-analysis and co-assessment which integrates safety and security lifecycle called FVMEARA (Failure and Vulnerability Modes, and Effect Analysis and Risk Assessment). This integration is achieved by using safety risk assessment method based on likelihood of faults and security risk assessment based on vulnerability scoring system in a unified methodology. The proposed solution must comply with the standards IEC 60812 for safety and the standard IEC 62443 for security.

This paper is organized as follows : Section 2 is a summary of the state of the art related to risk assessment methods in distributed digital systems and vulnerability scoring systems. Section 3 presents some preliminaries. Section 4 presents Hazards/Threats Impacts, vulnerability assessment, and risk analysis. Section 5 details the Industrial Control Vulnerability Scoring System (ICVSS). Sections 6 and 7 describe the proposed methodology, Failure and Vulnerability Modes, and Effect Analysis and Risk Assessment (FVMEARA). In last part, the conclusion and the future work are given.

2 Related works

Several articles were published that provide the main definitions of dependability in distributed digital systems such as safety and security, and their attributes such as faults, errors, failures, vulnerabilities and their causes have been well detailed in (Avizienis et al. (2004); Pièrre-Cambacédès and Bouissou (2010)).

In (Nicol et al. (2004)), the authors present a classification of different approaches to combining safety and security. Several works were done to model the stochastic behavior to assess reliability of ICSs. Sallhammar et al. (2006) propose game theory to model to compute the probability of attacker behavior by state machine stochastic model while Chen et al. (2011) suggest the use of stochastic Petri nets to have more complete modeling to avoids the explosion of the state space. Game theory is also used to model human interactions and particularly the relationship between cyber attacks and operators (Backhaus et al. (2013)).

In recent years, some major IT security companies and organizations have provided rating systems to assess information system (IT) vulnerabilities. (A vulnerability is a weakness or bug in software or hardware application, systems, device or service that allows an attacker to potentially cause a loss of confidentiality, integrity and availability). Many companies such as IBM, Symantec, Microsoft and Secunia have created their own vulnerability rating systems called X Force, Symantec Security Response Threat Severity Assessment, Security Bulletin Severity Rating System respectively. The NVD (National Vulnerability Database) is a standards-based US government vulnerability management database (NIST (2019)). It provides basic CVSS (Common Vulnerability Scoring System) measures that give a quantitative and a score for each vulnerability. The first open vulnerability scoring system CVSS was realized, in 2005, by the U.S. government's National Infrastructure Assurance Council (NIAC) (*Complete CVSS v1 Guide* (2019)). Subsequently, several enhancements were released (Mell and Scarfone (2007); Scarfone and Mell (2009)). In addition, CVSS has been used in several studies to estimate the security parameters, such as MTTC (Mean Time To Compromise) (McQueen et al. (2006)).

In recent years, several researchers have attempted to adapt the CVSS to OT (Operation Technologies) systems (Qu and Chan (2016)). Next, the open Robot Vulnerability Scoring System (RVSS) is proposed for robotic systems (Vilches et al. (2018)). A few works focus on the relation between safety and security risk assessment, although safety/security risk co-analysis is very important to avoid any conflict of safety and security requirements (Pièrre-Cambacédès et al. 2010). Chemali et al. (2019) introduce a first vulnerability scoring system for Industrial Control Systems called ICVSS (Industrial Control Vulnerability Scoring System). The methodology uses different approaches to score vulnerabilities, depending on characteristics of Industrial Control Systems to integrate the effects and the impacts of an attack on control loops in terms of loss of control,

Maximum Abbreviated Injury Scale	SIL reference [IEC61508]	Risk reduction factor (SIL)
S1	No injuries	10-100
S2	Light and moderate injuries	100-1000
S3	Severe and life-threatening ; injuries (survival probable).	1000-10000
S4	Life-threatening injuries (survival uncertain), fatal injuries	10000-100000

TABLE 1 – Safety integrity level metrics and corresponding proportions

loss of view, or denial of service that can impact safety and security

3 Preliminaries

The following sections provide some general information on the definition of risk, and the Security Integrity Levels (SIL) used in our methodology. These are methods from different computer disciplines, not only from the ICS field. However, they are then particularly adapted and interlinked to enable a good assessment security and safety risks.

3.1 Risk definition

Cybersecurity Risk is the potential that a given attacker will capture and exploit your critical information, which will have a negative impact on industrial facilities. Different organizations define risk in different ways. In general, risk in most engineering disciplines is defined as follows (e.g. [EN50126] (Wolf and Scheibel (2012))) :

$$Risk = Likelihood of an accident \times Impact \quad (1)$$

3.2 Safety Integrity Levels (SIL)

Safety Integrity Levels (SILs) are a discrete and systematic classification, varying from SIL 1 (for lowest reliability) to SIL 4 (for highest reliability). Depending on the standard applied, safety integrity (and thus SIL) is a concept applicable to safety-related electrical/electronic/programmable electronic (E/E/PE) systems (for IEC 61508 (61508 (2005))) or safety-related instrumented systems (SIS) (for IEC 61511 (61511 (2004)) [IEC, 2004]). In the table(1 the safety integrity level metrics and corresponding proportions(Wolf and Scheibel (2012).

4 Impacts, vulnerabilities assessment, and risk analysis

For CPPS security, the likelihood of an accident can be compared with the accessibility of the attacker to exploit a weakness in the system. In our case, attack potential describes the accumulated technical, and intellectual resources that are needed to successfully mount a certain attack. This approach is based on the significant hypothesis that the probability of an accident (which in our CPPS security scenario means a successful security attack) decreases with the increase in the required potential attack.

4.1 Impacts and Consequences Determination

We look at the direct impacts of the identified potential hazards/threats and faults/vulnerabilities and their consequences on the system as a whole and assess the resulting risks. In this work we present a new systematic approach to a quantified safety/security risk analysis based on risk matrix which takes the ICVSS rating system and impact (Collateral Potential Damage (CPD)) as inputs in order to better assess the risks of attacks on CPPS. The worst impact is when safety of staff is affected. In fact, staff safety is the first priority for all actors of the system. However, various events can endanger health and safety, not to mention the terrorist threats that must be taken into account when protecting production systems. The impacts identified may touch on one or more aspects. According to the area affected. We define three types of impact (Rekik et al. (2018)) : safety impact, financial impact and operational impact. For space limitations, we choose only to present the safety impact and the financial one. For each type, we define 3 levels of severity. For the assessment of the impact, we use the same in Rekik et al. (2018) but with some adaptations. The methodology Wolf and Scheibel (2012) assigns the consequences of each type of impact (Table 1), according to their level of severity. A decimal power scale was used to evaluate the severity according to the impacted area. The total impact is determined as :

$$Impact = Impact_{Safety} + Impact_{Financial} \quad (2)$$

We are using a qualitative scale (1,2 to assess the impact(Rekik et al. (2018); Wolf and Scheibel (2012)).

4.2 Identification of Security Objectives, Security Threats, and Attack Paths

Before we can evaluate any attack, we need to identify high-level security and safety objectives, sometimes

Severity level	Severity level	Risk reduction factor
S1	No or tolerable financial damage	1-10
S2	Undesirable financial damage and/or the incident may have an impact on the public image of the company	10-100
S3	Substantial financial damage, but yet not existence-threatening and/or the incident may have a serious impact on the public image of the company	100-1000
S4	Existence-threatening financial damage and/or the incident will incur people suing the company, severe impact to the public image of the company	1000-10000

Table 2 – Financial impact level

also referred to as security objectives or security goals. Security objectives include all relevant security assets (e.g., critical data, functionality, or resources) and security policies (e.g., "Only authorized personnel may change the operating parameters of this system component"), as well as potential use cases and issues that need to be addressed at a very high level.

4.3 Vulnerability assessment and likelihood determination

The calculation of probability of attacks is a big challenge, it is commonly carried out using the method for calculating the attack potential (AP) that is specified by the standardized method Common Criteria ISO (2017) which is also applied by the ETSI TVRA (2011-03) and in the risk analysis approach described in Wolf and Scheibel (2012); Rekik et al. (2018). In our approach, the likelihood of an attack is replaced by ICVSS (Chemali et al. (2019)) to calculate the accessibility of a potential attack to exploit any vulnerability.

Firstly, we assess the vulnerability by ICVSS. In fact, it can measure the effort necessary to mount a successful attack against the system under consideration. The factors taken into account in determining the score of ICVSS and their ranges and values are presented in the figure 1(Chemali et al. (2019)).

5 ICVSS Methodology

Despite the improvement which has been made compared to version 1, the conventional CVSS version 2 is not suited to assessing the vulnerability for the domain of industrial systems. Indeed, environmental metrics considered as optional metrics in CVSS, are essential in case of industrial system vulnerability. These metrics allow integrating the effects and the impacts of an attack on control loops in terms of loss of control, or loss of view, or denial of service that can impact safety and security. In the following section, we present an adaptation of CVSS for Industrial Control Systems called ICVSS (Industrial Control Vulnerability Scoring System) based on CVSS version 2. We propose to improve and refine each metric, keeping the same CVSS methodology (fig 1). The proposed scoring system based on the calculation of variety of metrics distributed into two groups of metrics inherited from the classical CVSS metrics. These metrics allow refining and adapt score results for CPPS. In the following we present these groups of metrics.

5.1 BASE metrics

5.1.1 Access Vector (AV)

This metric is divided into two sub-metrics :

(i) Physical Media (PM) :

This sub-metric measures the media that could be used to exploit the vulnerability. The possible values are : Physical device (0.2) when the intrusion can come through a USB key ; Wired (0.395) : this possible value is assigned when the attacker could exploit the vulnerability by a wired media. Lastly, Wireless (1.0) is assigned when the vulnerability can come through a wireless media.

(ii) Access Layer (AL) :

This sub-metric is designed to measure the layer where the vulnerability could be exploited. The possible values are : Network (1.0) when the attacker exploits a vulnerability that comes from the Internet ; Adjacent Network (0.646) when threat comes from Virtual Private Network (VPN) ; Local network (0.395) when threat comes from Local Area Network (LAN). The last possible value is the Physical (0.2), when the attacker needs physical contact with the ICS system components.

5.1.2 Access complexity (AC) :

This metric measures the complexity of the attack that exploits the vulnerability. The metric is divided into two sub-metrics :

(i) System complexity [SC] : Distributed system

(e.g., SCADA power distribution systems) is more vulnerable to attacks, because it is physically distributed over several sites. The coordination between the different sites is ensured by the communication networks (e.g., WAN (wide area networks) ; and NAN (Neighborhood Area Networks)(Zhang (2015)). Consequently, the attacker can use less sophisticated attacks to compromise the system compared to the system which is physically located on single and isolated site. The possible values are : Simple (0.35), when the facility located on a single isolated site ; Distributed (0.71), when the facility is distributed over several sites.
(ii) Attack complexity [ATC] : In this metric we keep the same definition of the CVSS which measures the complexity of the attack that required to exploit the vulnerability (Access Complexity (AC)). There are three possible values.
High (0.35) : This value is assigned when the attack requires a lot of time, several steps, knowledge, and skills to exploit the vulnerability. Usually these attacks are launched by terrorist and nation-state threats (group 1)(e.g., Stuxnet attack) ("ICS-CERT" 2019). Medium (0.61) : this value is assigned when the attacker needs for less knowledge and technical skills than group 1 to exploit the vulnerability. Usually, these attacks are launched by organized threats (group 2) where their motivation may be financial, or revenge, or theft of trade secrets, or to draw attention to a cause (hacktivists)(*ICS-CERT* (2019)).
Low (0.71) : this value is assigned when the attack requires less structured and sophisticated knowledge and technical skill than the group (2), which can be quite advanced. These attacks are launched by mainstream threats (group 3) where their motivations have been related to notoriety, fame, or attacking a system to attract attention to themselves(*ICS-CERT* (2019)).
Cryptography [C] : This sub-metric presents the encryption level of exchanged data (e.g., the communication protocol has an encryption system). The possible values are : Non (0.71), Encrypted (0.35).

5.1.3 Security Impact (C, I, A) :

The same definitions are used in the conventional CVSS version 2 to measure the Confidentiality (C), Integrity (I), and Availability (A) impacts.

5.1.4 Safety System (SS) :

This sub-metric measures the presence of safety systems in the facility that should protect the equipment and the people from harmful situations that may arise from operating. The possible values are : None (0.9), Safety System (0.01).

5.1.5 Authentication (Au) :

This metric describes the number of authentication required to perform the attack. The possible values are : Multiple (0.45), Single (0.56), and None (0.704).

5.2 Temporal metric :

5.2.1 Exploitability (E) :

this metric includes three sub-metrics :

(i) System Access [SA] : This sub-metric presents the degree of accessibility to useful information (about the hardware or about the software), when an attacker intends to launch cyberattack. The possible values are : Open Source (0.85), Proprietary (1.0).
(ii) Maturity [M] : We adopt the same definition of Exploitability (E) in CVSS version 2. The possible values are : High (1.0), Functional (0.95), Proof of concept (0.90), Unproven (0.85).

5.3 Remediation Level (RL) and Report Confidence (RC) :

The same definition is used in CVSS version 2 to measure Remediation Level (RL) and Report Confidence (RC)(for more details see Chemali et al. (2019)).

5.4 ICVSS Mathematical formula

With these metrics, the score (BS) and its sub-scores, exploitability (ES) and impact score (IS), can be calculated through the next formula (Chemali et al. (2019)] :

$$ES = 20 \times AV \times AC \times Au$$

$$IS = 10.41(1 - (1 - C)(1 - I)(1 - A))$$

$$F(IS) = \begin{cases} 0 & if \quad IS = 0 \\ 1.176 & if \quad IS \neq 0 \end{cases}$$

$$BS = RoundTo1Dec((0.6 \times IS + 0.4 \times ES - 1.5) \times f(IS))$$

$$TemporalScore = RoundToDecimal(BS \times E \times RL \times RC)$$

The score , defined between 0.0 and 10, expresses the overall severity of the vulnerability on the system (see the Table 3).

CVSS v 2.0	ICVSS
BASE Metric	
Exploitability Group	
Access Vector, AV	***Access Vector, AV***
Local (L); Adjacent Network (A); Network (N).	**SUB-METRICS GROUP**
	PHYSICAL MEDIA, PM
	USB key (USB); Wired (W); Wireless (WL);
	ACCESS LAYER , AL
	Physical (P); Local (L); Adjacent Network (A); Network (N).
Access Complexity, AC	***Access Complexity, AC***
Low (L); Medium (M); High (H).	**SUB-METRICS GROUP**
	SYSTEM COMPLEXITY, SC
	Simple (S); Distributed (D).
	ATTACK COMPLEXITY, ATC
	High (H); Medium (M); Low (L).
	CRYPTOGRAPHY, C
	Non (N); Encrypted (E).
Authentication, Au	***Authentication, Au***
Multiple (M), Single (S), None (N).	Multiple (M); Single (S); None (N).
Impact group	
Security Impact (C, I, A)	***Security Impact (C, I, A)***
None (N); Partial (P); Complete (C).	None (N); Partial (P); Complete (C).
	Safety System, SS
	None (N); Safety System (SS).
Temporal Metric	
Exploitability, E	***Exploitability, E***
Unproven (U); Proof-of-Concept (PoC); Functional (F); High (H); Not Defined (ND).	**SUB-METRIC GROUP**
	SYSTEM ACCESS, SA
	Open Source (OS); Proprietary (P).
	MATURITY, M
	Unproven; Proof-of-concept; Functional; Not Defined (ND).
Remediation level, RL	***Remediation level ,RL***
Official-fix (OF); Temporary-fix (TF); Workaround (W); Unavailable (U); Not Defined (ND);	Official-fix (OF); Temporary-fix (TF); Workaround (W); Unavailable (U); Not Defined (ND);
Report Confidence , RC	***Report Confidence , RC***
Unconfirmed (U); Uncorroborated (UC); Confirmed (C); Not Defined (ND).	Unconfirmed (U); Uncorroborated (UC); Confirmed (C); Not Defined (ND).

FIGURE 1 – Comparison of the indexes of the CVSS v 2.0 And ICVSS

Rating	CVSS Score
Very Low	0.0 - 1,9
Low	1.9 - 3.9
Medium	4.0 - 6.9
High	7.0 - 7,9
Very High	7.9 - 10

TABLE 3 – Qualitative severity rating scale

Likelihood	Risk Level			
Certain	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable
Likely	Medium	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable
Possibly	Acceptable	Medium	Unacceptable	Unacceptable
Unlikely	Acceptable	Acceptable	Medium	Unacceptable
Remote	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Medium
	Insignificant	Medium	Critical	Catastrophic
	Impact			

FIGURE 2 – Safety risk matrix

Scoring System	Risk Level			
Very hight	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable
High	Meduim	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable
Meduim	Acceptable	Meduim	Unacceptable	Unacceptable
Low	Acceptable	Acceptable	Meduim	Unacceptable
Very low	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Meduim
	Insignificant	Medium	Critical	Catastrophic
	Impact			

FIGURE 3 – Security risk matrix

5.5 Security and safety risk assessment

The risk matrices are used to determine the level of risk (Likelihood/Score x impact) and to decide whether or not it is acceptable. In industrial systems, a risk is considered as not acceptable when its value is high or critical, and acceptable if its value is low or negligible Rekik et al. (2018). In our case, we add the security risk matrix by replacing the likelihood by the ICVSS (2,3). The risk matrices will also be used to identify mitigation solutions. Actually, countermeasures will be applied in such way that to reduce the severity of the faults/vulnerabilities, but never the impact it could have on the system. Therefore, if a hazard/threat presents an unacceptable risk, we must push vertically through the matrix to the nearest acceptable cell (see figures 2,3). In a risk assessment, the impacts on the system have to be evaluated without any additional countermeasure in order to see the real consequences(Rekik et al. (2018)).

6 Annotated FVMEARA cause-effect chain

We are looking for a new method of safety/security co-analysis that starts with a system analysis similar to STPA-Sec (Security Theoretic Process Analysis (Young and Leveson (2013)), which identifies the functional control structure of a system, including

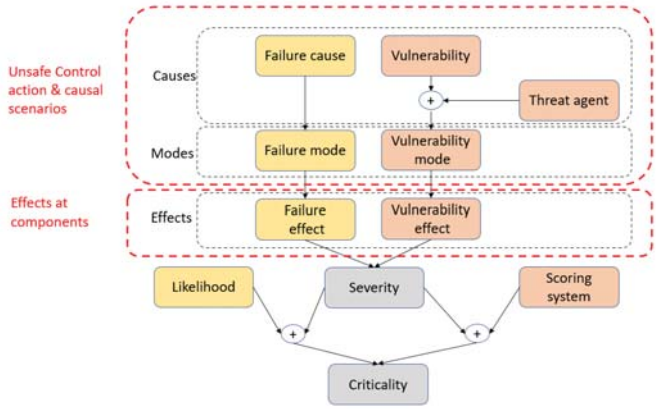


FIGURE 4 – Annotated FVMEARA cause-effect chain

the relationships between the system and the environment. This may include extensions or modifications to the original STPA-Sec to improve its coverage of safety topics, for example(Schmittner et al. (2016)). The resulting graphical model of the functional control structure will help stakeholders to identify potential risks to reliability, safety and security. Figure 4 shows the information flow in the FMVEA cause-effect chain (see Schmittner et al. (2014)).

7 Risk assessment methodology

We propose a safety and security integration methodology for the design of CPPS. This integration is achieved by merging safety and security methods (see Fig 5). In this section we present our unified methodology called FVMEARA (Failure and Vulnerability Modes, and Effect Analysis and Risk Assessment) that allows integrating safety and security risk assessment. Even more, the proposed solution must be compliant with safety and security standards for industrial systems. Consequently, we use the standard IEC 60812 for safety and the standard iSA/IEC 62443 for security.
In case of safety analysis, the basic approach to carry out an FMEA is described in IEC 60812. A system is divided into physical components, and failure modes for each component are identified. For each failure mode the effects, the severity of the final effect on the system and potential causes are examined. As far as possible, frequency or probability of the failure modes are estimated. However, in case of security analysis, the essential precondition for a successful security breach of a system is a vulnerability. In our methodology, a vulnerability is comparable to a failure cause and represents the basic prerequisite in security. For information security ISO/IEC 27005 divides vulnerabilities into categories : Network, Software, and Hardware vulnerabilities Schmittner et al. (2014). A vulnerability or threat mode is similar to the failure mode of safety and describes the manner in which the security fails. Threat mode is the effect by which the exploitation of vulnerability is observed. Next, for each mode, the detection procedures and the required corrective actions must be specified. The safety/security risk assessment methodology includes 23 phases. The first step identifies high-level safety/security objectives, sometimes also called safety/security objectives or goals. For example, the security objectives include all relevant security assets (e.g., critical data, functionality or resources) and security policies (e.g. "Only authorized personnel may change the operating parameters of ICS components"). Step 2 is the identification of the system that has need to be studied. It involves a functional specification and design phase, which looks at identifying the physical and IT equipment of the system. Step 3,4,12,13 and, 14 address the system threat landscape through hazards/threats and fault/vulnerability analysis. When potential hazards/threats or faults/vulnerabilities to the system are identified, then their direct impacts and consequences on the system must be assessed. Then, the likelihood/score of each identified hazard/threat should be determined in steps 5 and 14 respectively.

In the steps 6 and 7 for safety and steps 15 and 16 for security, the mode and effect are identified by identifying the effect by which the failure or the exploitation of vulnerability is observed. And for each mode, the detection procedures and the required corrective actions must be specified. Once failure/vulnerability mode and effect are identified, their direct impacts and cascading consequences on the whole system should be studied in steps 8 and 17. This procedure is taken from IEC 60812. The steps 9 and 18 are consisting of the calculation of the safety/security risk matrix using determined likelihood/score and impact levels. In steps 11 and 21, the countermeasures should be implemented to mitigate the intolerable risks. Next, the score or likelihood should be re-evaluated to measure the effectiveness of the proposed measures. If some risks are considered unacceptable, then a set of supplementary countermeasures must be proposed. In step 22, the alignment between safety and security is performed. Steps 3 until 22 should be repeated again until all risks become tolerable. Finally, the safety/security risk assessment process would have to conclude with a documentation phase.

8 Conclusion

In this paper we have proposed a methodology called FVMEARA for merging safety and security risk assessment CPPS at early development phases or in operation phases. We outline the vision for a hybrid method that combines elements of the

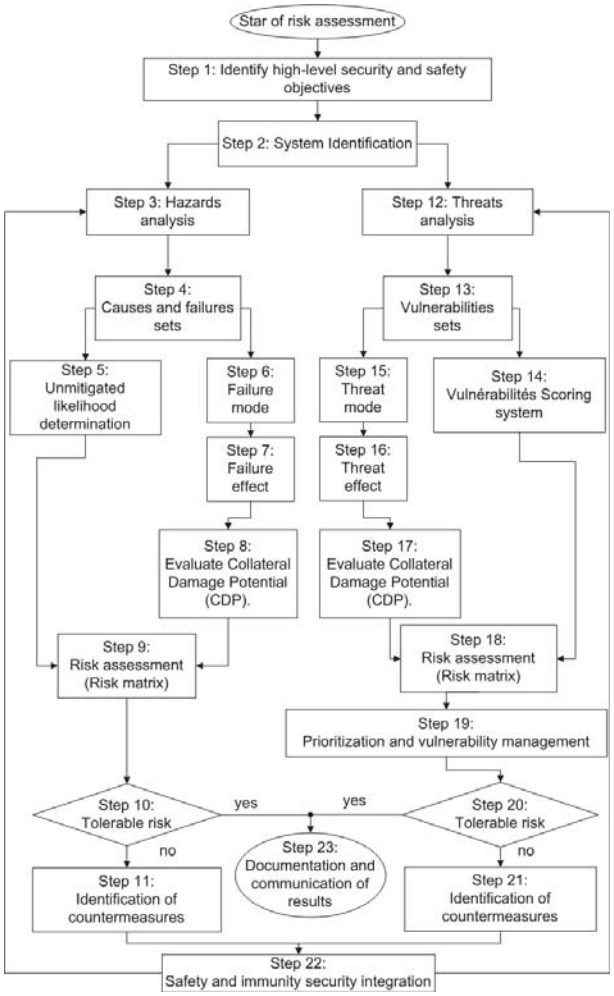


FIGURE 5 – Risk assessment methodology based on ISA/IEC-62443 and IEC60812

popular approaches from the systems and component side FMVEA and IEC/IEC 62443. Using this methodology engineers can align safety and security activities, by following the aligning 23 steps of safety and security life cycle methodology. The advantage of our methodology :

- we have used a very rich scoring system (ICVSS) that can assess vulnerabilities in a more accurate way.
- ICVSS is a language that facilitates communication between safety and cyber security engineers (because CVSS is the most used language in the security community).
- We have found a link between safety methods and security methods, this will allow us to use a lot of safety methods or methodologies, by replacing the likelihood by a score system to evaluate security.

In the future work, we will further develop the impact aspect by including other environmental metrics such as Target Distribution (TD). After we will apply our approach to a production system then to other industrial use cases such as railway systems. Some good practices and related techniques for the development of safer, more secure future industrial systems will be discussed.

Références

(2011-03), E. T. . .-. V. (2011). Part 1 : Method and proforma for threat, risk, vulnerability analysis, *Standard* .

61508, I. (2005). Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, *International Electrotechnical Commission* .

61511, I. (2004). Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, *International Electrotechnical Commission* .

Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B. and Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing, *IEEE transactions on dependable and secure computing* **1**(1) : 11–33.

Backhaus, S., Bent, R., Bono, J., Lee, R., Tracey, B., Wolpert, D., Xie, D. and Yildiz, Y. (2013). Cyber-physical security : A game theory model of humans interacting over control systems, **4**(4) : 2320–2327.
URL: *http ://ieeexplore.ieee.org/document/6665110/*

Banerjee, A., Venkatasubramanian, K. K., Mukherjee, T. and Gupta, S. K. S. (2011). Ensuring safety, security, and sustainability of mission-critical cyber–physical systems, *Proceedings of the IEEE* **100**(1) : 283–299.

Chemali, R., Conrard, B. and Bayart, M. (2019). ICVSS : A new methodology for scoring industrial control systems vulnerabilities, *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference*, European Safety and Reliability Association. OCLC : 8339510257.

Chen, T. M., Sanchez-Aarnoutse, J. C. and Buford, J. (2011). Petri net modeling of cyber-physical attacks on smart grid, **2**(4) : 741–749.
URL: *http ://ieeexplore.ieee.org/document/5967924/*

Complete CVSS v1 Guide (2019).
URL: *https ://www.first.org/cvss/v1/guide*

ICS-CERT (2019).
URL: *https ://ics-cert.us-cert.gov/*

ISO (2017). Common critera, common methodology for information technology security evaluation : Evaluation methodology, *Standard* .

McQueen, M., Boyer, W., Flynn, M. and Beitel, G. (2006). Quantitative cyber risk reduction estimation methodology for a small SCADA control system, *Proceedings of the 39th Annual*

Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'06), IEEE, pp. 226–226.
URL: *http ://ieeexplore.ieee.org/document/1579754/*

Mell, P. and Scarfone, K. (2007). Improving the common vulnerability scoring system, *IET Information Security* **1**(3) : 119–127.

Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W. and Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing, *Cirp Annals* **65**(2) : 621–641.

Nicol, D. M., Sanders, W. H. and Trivedi, K. S. (2004). Model-based evaluation : from dependability to security, *IEEE Transactions on dependable and secure computing* **1**(1) : 48–65.

NIST (2019). Nvd vulnerability metrics.
URL: *https ://nvd.nist.gov/vuln-metrics/cvss*

Pièrre-Cambacédès, L. and Bouissou, M. (2010). Modeling safety and security interdependencies with bdmp (boolean logic driven markov processes), *2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE, pp. 2852–2861.

Pièrre-Cambacédès, L. and Bouissou, M. (2013). Cross-fertilization between safety and security engineering, *Reliability Engineering & System Safety* **110** : 110–126.

Qu, Y. and Chan, P. (2016). Assessing vulnerabilities in bluetooth low energy (BLE) wireless network based IoT systems, IEEE, pp. 42–48.
URL: *http ://ieeexplore.ieee.org/document/7502262/*

Reinhart, G., Engelhardt, P., Geiger, F., Philipp, T., Wahlster, W., Zühlke, D., Schlick, J., Becker, T., Löckelt, M., Pirvu, B. et al. (2013). Cyber-physische produktionssysteme. produktivitäts-und flexibilitätssteigerung durch die vernetzung intelligenter systeme in der fabrik, *wt-online, Jg* **103**(2) : 84–89.

Rekik, M., Gransart, C. and Berbineau, M. (2018). Cyber-physical security risk assessment for train control and monitoring systems, *2018 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*, IEEE, pp. 1–9.

Sabaliauskaite, G. and Mathur, A. P. (2015). Aligning cyber-physical system safety and security, *Complex Systems Design & Management Asia*, Springer, pp. 41–53.

Sallhammar, K., Helvik, B. E. and Knapskog, S. J. (2006). On stochastic modeling for integrated security and dependability evaluation., *J. Networks* **1**(5) : 31–42.

Scarfone, K. and Mell, P. (2009). An analysis of CVSS version 2 vulnerability scoring, *2009 3rd International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*, IEEE, pp. 516–525.
URL: *http ://ieeexplore.ieee.org/document/5314220/*

Schmittner, C., Gruber, T., Puschner, P. and Schoitsch, E. (2014). Security application of failure mode and effect analysis (fmea), *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*, Springer, pp. 310–325.

Schmittner, C., Ma, Z. and Puschner, P. (2016). Limitation and improvement of stpa-sec for safety and security co-analysis, *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*, Springer, pp. 195–209.

Scholz-Reiter, B., Veigt, M. and Lappe, D. (2013). Entwicklung eines cyber-physischen logistiksystems, *Industrie Management 1/2013-Vierte industrielle Revolution* p. 15.

Vilches, V. M., Gil-Uriarte, E., Ugarte, I. Z., Mendia, G. O., Pisón, R. I., Kirschgens, L. A., Calvo, A. B., Cordero, A. H., Apa, L. and Cerrudo, C. (2018). Towards an open standard for assessing the severity of robot security vulnerabilities, the robot vulnerability scoring system (RVSS).
URL: *http ://arxiv.org/abs/1807.10357*

Wolf, M. and Scheibel, M. (2012). A systematic approach to a qualified security risk analysis for vehicular it systems, *Automotive-Safety & Security 2012* .

Young, W. and Leveson, N. (2013). Systems thinking for safety and security, *Proceedings of the 29th Annual Computer Security Applications Conference*, pp. 1–8.

Zhang, Y. (2015). *Cybersecurity and reliability of electric power grids in an interdependent cyber-physical environment*, PhD thesis, University of Toledo.

THE COMPLEXITY OF THE TERRITORIAL LOGISTICS ECOSYSTEM

Ebtissem Sassi * 1,2,3
[1]Department of Technology and Management, Institute of Business Administration of Annecy, University of Savoy Mont Blanc, France
[2]Normandy Innovation Management Enterprise Consumption Laboratory, Le Havre University, Normandy University, France
[3]Le Havre Applied Mathematics Laboratory, Le Havre University, Normandy University, France
ebtissem.sassi@univ-lehavre.fr

Abdellatif Benabdelhafid 3,4,5
[3]Le Havre Applied Mathematics Laboratory, Le Havre University, Normandy University, France
[4]Distinguished university professor emerita, Le Havre University, Normandy University, France
[5]Visiting Professor at Universiapolis
abenabdelhafid@gmail.com

ABSTRACT: *The integration of supply chain actors, responsible for the main steps of the ex-change of physical flows, in making territory planning decisions allows optimizing the exchange of physical flows. Also, this upstream integration allows minimizing the negative environmental, economic and social impacts due to the use of the territory. The transport service is thus improved, the additional transport costs due to the installation of logistics buildings are reduced and delivery or supply times are minimized.*
This paper aims to develop a methodology based on the multi-criteria analysis (MCA)approach and geographic information system (GIS) for the selection of the site with the best compromise based on multi-source criteria and integrating logistical optimization criteria. In this paper, we present the complexity of our problematic, then, we explain our approach combining GIS, MCA and mathematical models to optimize territory planning decisions.

KEYWORDS: *Territory planning, logistic, complex system, hybrid model.*

1 INTRODUCTION

Territory planning is a complex activity. This complexity is largely due to the characteristic of the territory which is considered a rare resource. This resource must be used properly due to the diversity of negative consequences due to being misused. On the other hand, this complexity is due to the multiplicity of actors involved in making territorial decisions. In the territorial projects, all actors demand more and more a big implication of questions linked to sustainable development in decision making.
Integration consists of considering, especially during the upstream steps of land use planning projects, the various constraints relating to the exchange of physical flows.

2 TERRITORY AND LOGISTICS: COMPLEX SYSTEM

It is important to indicate that in the context of this paper, we are mainly interested in issues related to physical flows.

2.1 Logistic

The transport logistics system is considered as a complex system. It is made up of supply and logistics demand.
Each subsystem is composed by several subsystems. The logistics offer is based on logistics and transport infrastructure (logistics platform, transport networks, etc.) and logistics actors (logistics service providers, etc.). Logistics demand refers to flows and stock levels corresponding to the needs expressed by the production system [1]. The logistics system is considered to be a complex system decomposed in different layers: a physical layer and an organizational layer to which is added an information layer [2].

2.2 Territory

The territory is considered to be a complex system composed by space, society (the human system) and the ecological system [3], while the territorial system is defined by gateways and flows [4].
A territorial system is defined by "an interface system which is appreciated in the combination of place and link, network and territory, point and line, doors and corridors" [5]. The territorial system is among the systems whose evolution and structure are the most difficult to understand and analyze.
Simon teaches that the decision is the "result of a choice and a result of a process of formulation and progressive resolution of a problem by a group of actors within an organization" [8].
Whereas "Environment and sustainable development decision-making entails a change towards new forms of governance which one of its essential ingredients is greater involvement of all the actors in the decision-making" [9].

2.3 The complexity of the study

The correlation between logistics and the territory can be shown following the exchange of physical flows stored

in logistics buildings, through transport infrastructure in a territory.
The complexity of the study can be represented by the figure below (fig. 1):

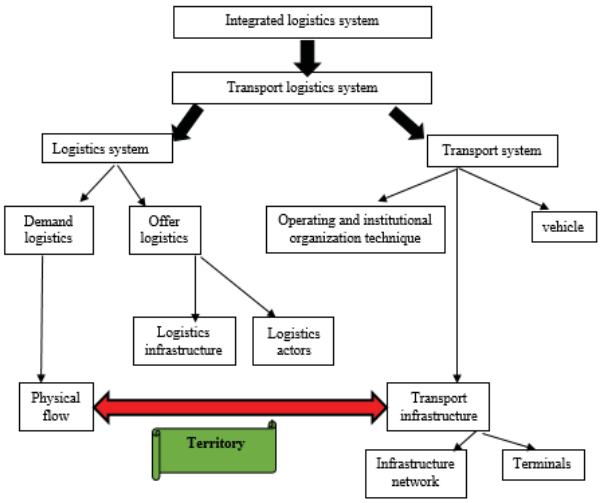


Figure 1 : The complexity of the study system

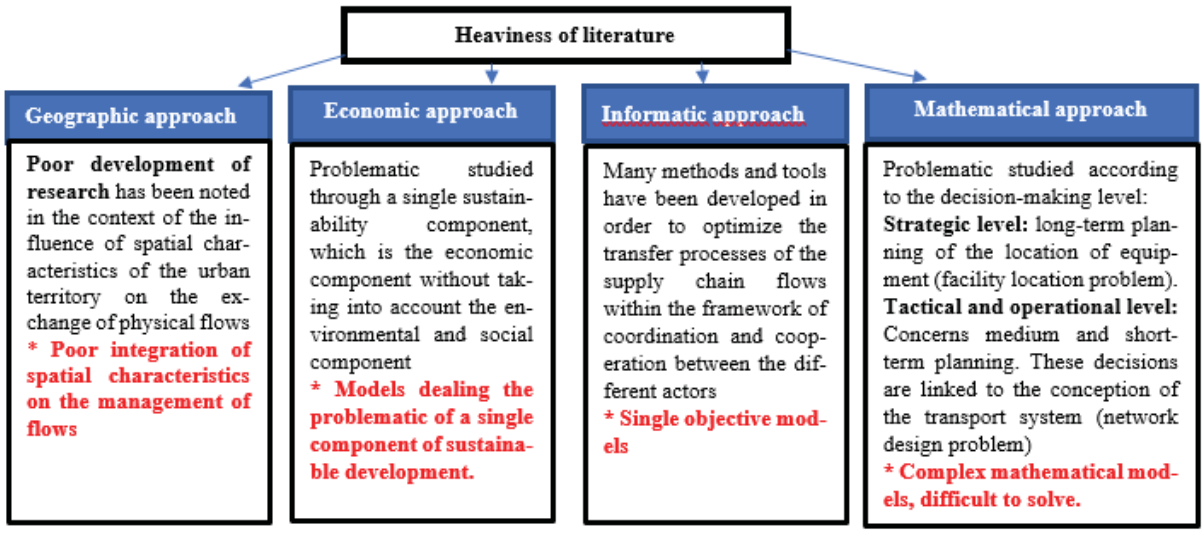


Figure 2: Multidisciplinary problematic

We propose a hybrid approach combining SIG-MCA and mathematical models to optimize territory planning decisions. Figure 3 shows the principle of the methodological approach adopted. Figure 4 illustrates the hybrid methodological approach.

3 HYBRID MODEL

In the literature, and following the complexity of the problematic of integration of logistics in the areas of spatial planning, there are many relevant approaches to address this problem, but this topic has not been sufficiently developed in the literature because it has not been addressed in a multidisciplinary approach.
This problematic has been treated by many approaches: the mathematical, economic, informatics and geographic approach; as part of optimizing the transfer of physical flows through the three strands of sustainable development. Figure 2 shows the multidisciplinary of this problematic.

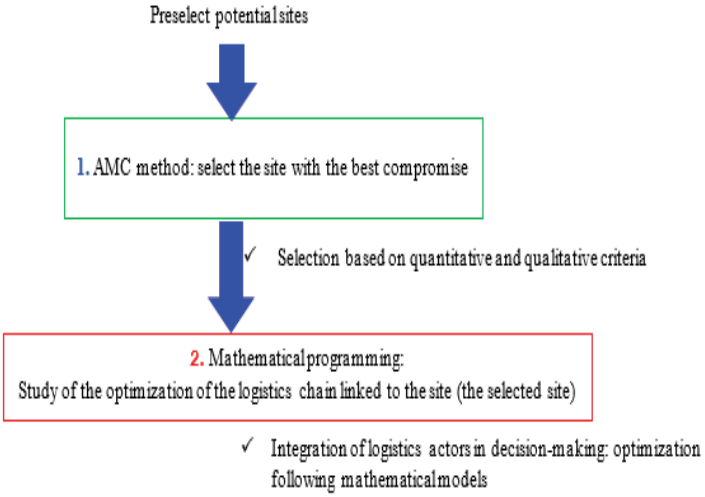


Figure 3: The principle of the methodological approach adopted

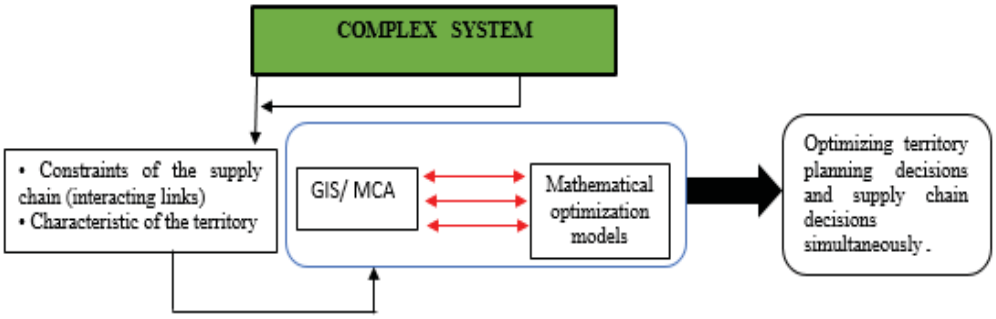


Figure 4: hybrid methodological approach

3.1 Approach adopted

Contrary to the traditional approaches used to treat the integrated problematic of territory planning and logistics, we adopt a multi-actor and multi-criteria approach.
We present on the flowchart (Fig. 5) our spatial planning approach integrating logistical optimization criteria and based on the AMC and GIS approach. Figures 5 and 6 shows the proposed approach.

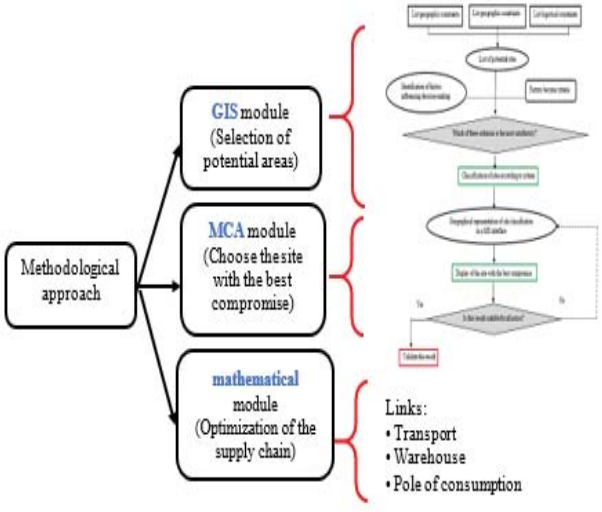


Figure 5: Hybrid methodological approach

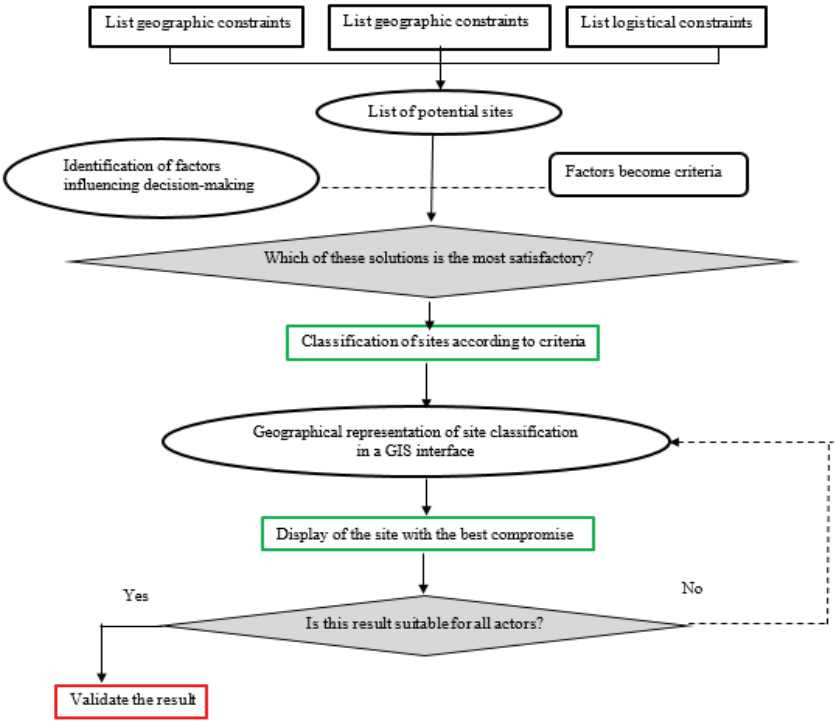


Figure 6: GIS and MCA modules

This approach is based on three modules:

• A GIS module to select potential areas. This integration aims at completing the current evaluation methods by tools facilitating the representation of complex information.

It is important to add precision to the GIS coupling finality: Indeed, our choice of GIS goes to the possibility of the use of data extracted from GIS and brings a visual dimension to the results.

• An AMC module to choose the site with the best compromise. The multi-criteria approach was chosen to classify solutions according to the priority order.

• And a mathematical module which aims at optimizing the supply chain.

The decision-support according to [10] is "bringing information which authorizes the surest appreciation of the possible fields and the most correct anticipation of the susceptible results of projected actions so as running the process could take place around the table rather than in the field".

3.2 GIS module

All the data collected is archived at the GIS. This tool for sharing information between all the actors involved in decision-making is the first phase of the model.

The objective of this phase is to consider all constraints upstream of decision-making. In this context, we distinguish two types of constraints:

• The constraints imposed by the specification sheet (functional constraints).

• The spatial constraints (geographic constraints).

First, the actors must identify all the constraints linked to territory planning. They must also think about integrating logistical optimization constraints. These constraints impose several characteristics that must be satisfied when determining the list of potential sites.

Secondly, the actors identify the factors influencing decision-making. These factors are considered as selection criteria. We cite in [6], for information, the main criteria relating to territorial decision-making.

3.3 MCA module

The criteria do not have the same order of importance, it is, therefore, necessary to prioritize them before integrating them into the decision support system. They are then prioritized according to their importance.

The ranking of criteria may vary over time given the evolution of sustainable development indicators.

After determining the site with the best compromise, we check whether it is suitable for all stakeholders or that it is necessary to start the search process another time.

We explain these two cases:

Case 1: need to re-prioritize the selection criteria: in the case where the result does not satisfy all the decision-makers, we:

- Reconfigure the weighting of the selection criteria: this involves making changes to the weights of the criteria.
- Launch a new search process: It is a matter of determining the classification of the sites again according to the new weighting.

Case 2: validation of the result: In the case where the result satisfies all the decision-makers, we:

- Archive the result: It is important to archive the classification of criteria because it may be useful for a future territory planning project.

3.4 Mathematical module

The optimization of physical flows between the different links in the logistics chain will be done in this step. Once, we identified the optimal site suitable for all stakeholders, the optimization approach and the mathematical models adopted were detailed in the paper [7]. To simplify this modeling, we adopt a direct delivery network where the company delivers directly the product to the customer without going through a warehouse of storage and distribution.

We limit our study to road transportation knowing that the reality of transport is multimodal. Our problem consists essentially in minimizing the cost of transportation in the hinterland between the harbor and the logistic building, at the level of:

- Upstream logistic: from supplier to the production.
- Downstream logistic: From production company to the customers.

3.4.1 Indices, parameters and decision variables

G: Set of consumption groups g, g∈ {1...G}
T: Set of means of transport t, t∈ {1…T}
D: Set of transport deadlines d, t∈ {1…D}
QT d: Quantity of transported freight in a deadline d.
UCd t: Unitary cost of freight transport between the harbor and the logistic building with a means of transport t.
UC′gd t′ : Unitary cost of freight transport between the logistic building and the consumption group with a means of transport t'.
TAWC t: Total authorized weight in charge of the means of transport used between the harbor and the logistic building.
TAWC t′: Total authorized weight in charge of means of transport t' used between the logistics building and the consumer pole.
FP t: Freight percentage related to the consumption group transported by a means of transport t.
FQ gd: Freight quantity related to a consumption group aiming at being transported in a period d.
DDS g: Delivery deadline or freight supplying expressed by consumption group g.
Q dt: Transported freight quantity between the harbor and the logistic building in a period d and by the means of transport t.
Q gdt′: T Transported freight quantity between the logistic building and the consumption group g during a period d and by the means of transport t'.
SC d: Storage cost in the logistics building in the period d.
PS g: Freight percentage stored related to a consumption group g.
Q dt: Quantity of freight transported between the harbor and the logistic building in the period d and by the means of transport t.
Q gdt′: quantity of freight transported between the logistic building and the consumption group g during the period d and by the means of transport t'.
SR d: Storage rate in the logistic building in a period d.
Csuppdeliv g : Supplying cost or of the delivery of freight-related to a group of consumption g of the period d (transportation cost and the freight value).
FQ gd: Freight quantity related to a group of consumption aiming at being transported in a period d.

3.4.2 Transportation objective function and Constraints

$$Min\left(\sum_{d=1}^{D}\sum_{t=1}^{T} UC_{dt} * Q_{dt} + \sum_{g=1}^{G}\sum_{d=1}^{D}\sum_{t'=1}^{T'} UC'_{gdt'} * Q_{gdt'}\right) \quad (1)$$

$$\mathbf{Q_{dt} \leq TAWC_t * FP_t, \forall t, d} \quad (2)$$

$$\mathbf{Q_{gdt'} \leq TAWC_{t'}, \forall g, t', d} \quad (3)$$

$$\mathbf{Q_{dt}, Q_{gdt'} \geq 0, \forall g, t, t', d} \quad (4)$$

$$Min\left(\sum_{d-1}^{D} SC_d * SR_d\right) \quad (6)$$

$$SR_d = SR_{(d-1)} + \sum_{t=1}^{T} Q_{dt} - \sum_{t'=1}^{T'} Q_{gdt'} \quad (7)$$

$$SR_d \geq 0 \forall d \quad (8)$$

$$\mathbf{SR_d \leq CSLB * PS_g} \quad (9)$$

$$Min\left(\sum_{g=1}^{G}\sum_{d=1}^{D} C\,\text{suppdeliv}_g * FQ_{gd}.\right) \quad (10)$$

4 APPLICATION

to validate our model, we chose the location problematic of a logistics building in the hinterland of the harbor of Rades (fig. 7).

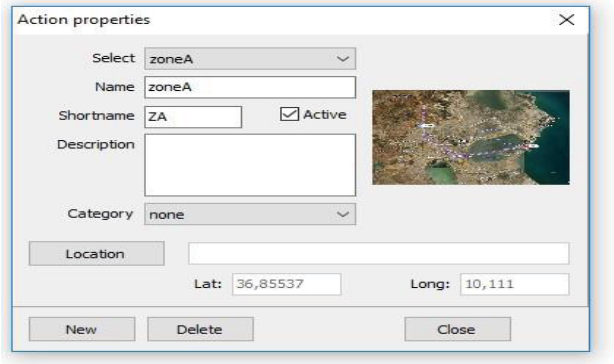


Figure 7: Case study

After inserting the data relating to the selection criteria (fig. 8), we can note that zone D is the optimal zone.

	Preferences			
	Min/Max	max	min	min
	Weight	1,00	1,00	1,00
	Preference Fn.	V-shape	Linear	V-shape
	Thresholds	absolute	absolute	absolute
	- Q: Indifference	n/a	5,000	n/a
	- P: Preference	15,000	30,000	2,00
	- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a
	Statistics			
	Minimum	32400,000	147,000	18,00
	Maximum	1812522,000	772,000	32,00
	Average	498647,000	383,500	24,25
	Standard Dev.	759162,614	249,958	5,58
	Evaluations			
☑	zoneA	32400,000	433,000	32,00
☑	zoneB	109626,000	772,000	27,00
☑	zoneC	1812522,000	182,000	20,00
☑	zone D	40040,000	147,000	18,00

Figure 8: Selection zone

CONCLUSION

If the spatial planning issue was treated in the literature as a mono disciplinary issue, our approach, meanwhile, is intended to be a crossroads between three aspects: organizational, mathematical and informational aspects.

This study shows the importance of considering logistical optimization criteria in the context of territory planning. The main stake of this work is to preserve the territorial resource, to limit the effects due to the bad use of this resource and to provide a quality service concerning the exchange of goods flows between the links of the supply chain.it show the correlation between two concepts from two different disciplines: logistics and territory. The integration of logistical constraints is inevitable in the context of sustainable development, because it optimizes the exchange of physical flows between the links and it helps to resolve the localization problem.

REFERENCES

1. Masson, S., & Petiot, R. Logistique et territoire : multiplicité des interactions et forces de régulation. Association de Science Régionale De Langue Française (Vol. 15), 385-412, 2013.
2. Hesse, M. R.-P., & Rodrigue, J.-P. The Transport Geography of Logistics and Freight Distribution. Journal of Transport Geography 12, 171-184, 2004.
3. Piot, J.-Y. Doctoral thesis "Geography, spatial planning and geogovernance - proposals for training actors to understand spatial issues". university of prevance - Aix-Marseille, 2007.
4. Cattan, N., & Fretigny , J.-B. Les portes d'entrée de la France et les systèmes territoriaux des flux. Des systémes spatiaux en prospective, territoires 2040, 61, 2011.
5. Cleef, V. Hinterland and Umland the Geographical Review, 1941.
6. Sassi, E., Benabdelhafid, A, Hammami, S., Territory planning model integrating GIS and Supply chain, International Journal of Transportation Engineering and Technology, 2019.
7. Sassi, E., Benabdelhafid, A, Hammami, S., A methodological approach of a hinterland planning project decision support. International Journal of Traffic and Transportation Engineering,2019.
8. Chevalier, J. (1990). Implantation d'un SIRS en milieu municipal: problème d'informatisation ou problème d'organisation. La géomatique, voir... à sa mesure. Montréal: Association de géomatique municipale du Québec.
9. Van den Hove, S. (2001). Approche participative pour la gouvernance en matière de développement durable: une analyse en termes d'effets. Helbing & Lichtenhahn, Bâle: Gouvernance I: gouvernance et développement durable, économie et écologie.
10. Roy, B. (1975). Combinatorial Programming: Methods and Applications. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, NATO Advanced Study Institutes Series. Series C: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 19, 459-497.

SUPPLY CHAIN ROUTING SCHEDULING SUB-MODEL DESIGN: CASE OF EXPORT BULK PORTS

S. Mallah*, ** **& A. Aloullal***
*ILO – University Mohammed 6 Polytechnic (UM6P),Bengueir, Morocco
**LTI – National School of Applied Sciences – Abdelmalek Essaadi University (AEU), Tangier, Morocco
sara.mallah@um6p.ma/sara.mallah@etu.uae.ac.ma, afaf.aloullal@um6p.ma

O. Kamach*, **, **M. Masmoudi*****, **N. Najid******, K.Kouiss*,*****, L. Deshayes***
***University Jean-Monnet, France
**** Mechanical and Productive Engineering Depart-ment, University of Nantes, France
*****SIL – Blaise-Pascal, university of Clermont Fer-rand, Aubière, France
oulaid.kamach@um6p.ma, malek.masmoudi@univ-st-etienne.fr,

ABSTRACT: *The integration of planning and scheduling decisions of loading, stacking/scraping, routing and production making up an integrated optimization plan without contradictory goals is vital for an efficient use of the four aforementioned bulk port operations. Usually, the optimization of these decisions is approached in an integrated fashion in one mathematical model. In this paper, we discuss another integration approach using a real case as an illustration. The proposed approach can improve the design phase in optimization problems and avoid the cons of the classical methodology. It can also come up with a number of pros which can be summed up mainly in the ability to design the optimization problems, in such a way to reflect the real aspects of the industrial settings.*

KEYWORDS : *shipping operations, optimization, transport problem, conveyor paths, problems integration.*

1 INTRODUCTION

In order for an export bulk terminal to deliver the right product, with good quality, to the right customer, in the right place and at the right time, an optimization of its logistics process is essential to set up. The case study in this work deals with an optimization which aims to return, in a reasonable planning time, an integrated operations plan maximizing the loading capacities over a planning horizon of tactical level. Where each of the four sub-problems (loading, stock, routing and production) making up the overall port optimization problem must maximize the loading capacities taking into account the other logistics operations which may have contradictory goals.

An alternative to planning and scheduling the port operations in an integrated approach, considering the four sub-problems in one mathematical model is to integrate the planning sub-problems as separated sub-systems interacting with each other in a smart fashion. The rational behind this alternative is because the integrated approach may lead to an optimization result which does not include all the specifications reflecting reality or that does not converge. Similarly, the option of treating each of these sub-problems separately has raised two very important questions:

- How to manage the interactions between the four sub-models so that the planning system converges in a reasonable response time and avoids quasi infinite interaction loops between the three sub-models?
- What are the decision variables, the objective-functions and the constraints of each sub-model, provided that consistency and avoidance of redundancy between the four sub-models are maintained?

A discussion about how a coupling strategy can allow to answer the questions above is presented along with how the routing model can be designed considering the real industrial settings. The paper is structured as follows: related works concerning the planning and scheduling of bulk port problems are provided in section 2. Section 3 will describe the problem at hand. Section 4 comprise the discussion about the coupling strategy and the routing problem. Finally, a conclusion and perspectives are given in section 5.

2 LITERATURE REVIEW

The belt-conveyors routing scheduling problem in bulk port has just been studied recently [2]. In fact, enormous efforts have been rather made toward optimizing transportation problems in container port terminals, which implies without having the belt-conveyors routes as a means of transportation [3, 4, 5, 6]. The authors of [3] tackled transportation systems for container port logistics by focusing mainly on task assignments problems or routing problems for automated guided vehicles, while the authors of [4] solved multi-trailer transportation routing problem and in [5], the authors solved the routing problem for a fleet of trucks with different capacities. The authors of [6], on the other hand, worked on the container allocation and the straddle-carrier routing problem. Apart from container ports, the transportation

optimization was studied in a general context in [7] which studies the vehicle routing and truck driver scheduling problem where routes and schedules must comply with hours of service regulations for truck drivers. Therefore, as bulk ports started to receive a growing interest conveyors-belt based transportation optimization is strongly demanded. In this paper, we are focused on the belt-conveyors routing scheduling problem, in bulk ports, in such a way to comply with the other operations planning and scheduling decisions, namely: stock management and reclaiming problem and berth allocation problem.

From the earliest work, we can find the work of [8] where the authors dealt with the belt-conveyor transportation routing problem along with the storage allocation problem where requests are given in real time. They provided a formulation of the problem using a mixed integer programming approach and proposed a Lagrangian decomposition to solve it and compared it with the hierarchical planning method.

In the same perspective, the authors of [2] dealt with the conveyor-belt transportation routing optimization along with stockyard optimization in an integrated fashion, while calling the integrated problem as the Product Flow Planning and Scheduling Problem. But they also considered more constraining aspects, compared to [8], such as route allocation constraints, product scheduling constraints and equipment capacity constraints.

In fact, instead of considering one mathematical model that would lead to uncontrollable complexity, or to an optimization result that miss real industrial use cases, and that wouldn't converge, we actually proposed to integrate the planning and scheduling sub-problems as separated sub-systems interacting with each other without falling in quasi-infinite interaction loops. And to the best of our knowledge, there is no optimization work in the literature that takes the interactions between subsystems into account before moving to the optimization of each subsystem, although these interactions cannot be neglected in a real case, otherwise, the returned solution of each subsystem will be biased. Besides, since the integration approach proposed in [1] managed to maintain consistency and avoidance of redundancy between the sub-models in terms of decisions, thus in terms of decision variables, constraints and objective functions. Then, as a result, the routing sub-model, has its constraints relaxed given that all the dynamic aspects of a real industrial setting are considered including the real conveyors paths matrix structure. In this paper, we are going to propose the model of the routing scheduling sub-problem.

3 PROBLEM DESCRIPTION

The problem investigated in this paper is motivated by a real case dealing with the planning and scheduling of an export bulk port. In order to fulfill its mission which is to supply the end customer (trucks / ships) with the requested product, the terminal possesses several types of equipment: stacker for stocking products, scrapers to scrape or destock the products, belt conveyors to transport products from a source to a destination, and gantry cranes to load ships. The trucks are loaded directly by pouring the product, contained within the belt conveyor, into the truck. The products moved through the port concern fertilizers and phosphates whose qualities differ in their chemical and physical characteristics such as granularity. Thus, for fertilizers and phosphates, there is a whole host of ranges or families of products and each of these ranges includes a whole set of qualities amounting to about 40 qualities.

The port platform is made up of four subsystems (figure 1) which are: the fertilizer and phosphate production lines, the storage sheds where the two operations of stocking and scraping are carried out, the set of conveyor routes for the transport and finally the loading stations, be it the berths for loading ships or the loading stations for trucks.

The production subsystem consists of several sets of production lines. In our case, these are four sets of production lines. Each set of production lines is connected to a unique set of the storage subsystem. Given that each set of the storage subsystem is composed of several hangars where different qualities of the products are stored.

The storage subsystem automatically includes four storage sets: A, B, C for the storage of fertilizers, and D for the storage of phosphates. All storage subsystems are supplied with products from their own factories. The stock subsystem B, in particular, can also receive products from the storage set: A.

The loading subsystem includes a trucks loading stations set and a vessels loading set. The trucks loading set consists of loading stations where each station manages to load a truck with product from the storage sets A and B only. While the vessels loading set is made up of several berths each housing a set of gantry cranes for loading vessels with products from all the storage sets: A, B, C, and D.

The routes subsystem is a combination of routes defining several path options through which products can be routed between the different subsystems. Many routes share common conveyors, so if products of different demands are to be transported at overlapping time intervals, they must be assigned to routes that do not overlap. Each route has a predefined capacity which must be respected. Figure 1 shows a general schematic about the four sub-

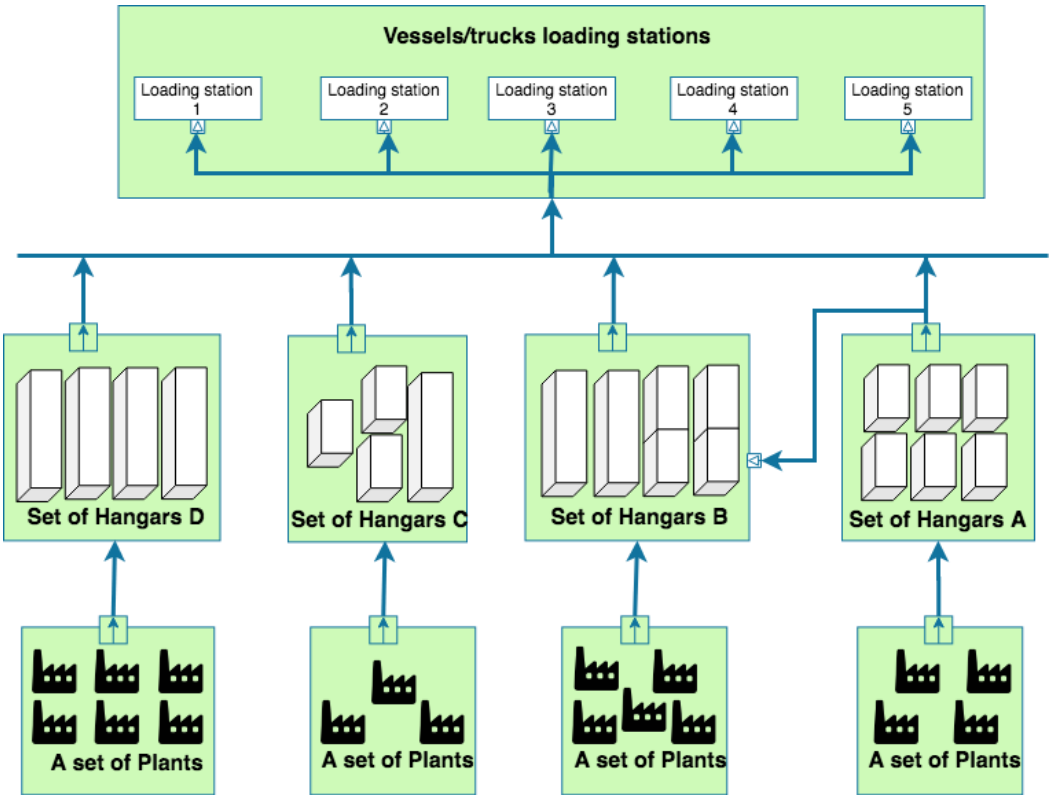


Figure 1 : The four sub-problems constituting the port platform

systems of: production, storage, loading and routes without representing the extreme degree of complexity of each of them. For instance, the conveyor routes combination whose each line illustrated in figure 1 refers to a whole combined set of paths.

In this paper, as already mentioned, the interest is focused on the routing sub-problem in particular. In addition, the port of the case study does not raise any need for optimization involving transport from the production lines since each storage shed has a production plant which supplies it with product. The need for optimization lies in the network between the storage and loading subsystems. In fact, the sets of the storage subsystem are not of the same kind, thus constituting six sources instead of the four already mentioned: A, B, C, D. To detail this further, each set of {A, C, D} is a homogeneous set. Which means that all the hangars of the same set have the same characteristics. Conversely though, the set B consists of hangars which do not have the same characteristics, thus generating three subsets of the set B.

More precisely, each of {A, C, D} is a set of hangars:

- Where each hangar has only one entrance or input, making it one destination at a time.
- Where each hangar has only one exit or output, making it one source at a time.
- The maximum output capacity is the same for all hangars in the same set: capacity C1 for sources in set A, and capacity C2 for sources in sets C and D. Given that C2 is greater than C1.

While set B is special in all aspects. It consists of hangars:

- Where each hangar has only one entrance, making it one destination at a time.
- The maximum entry capacity is the same for all hangars, which is C3.
- Where a subset of hangars B is at a single outlet making each of them a single source at a time with a maximum capacity C2.
- Whereas another subset of hangars B has two exits, making each of them two sources which, in turn, are not homogeneous. Because the two sources are at a maximum capacity C1 and C2 respectively.

The loading subsystem is made up of destinations with different maximum capacities: C4 for trucks loading stations and C1 and C2 for berths gantry cranes.

The routing sub-model is intended to transport the products between the sets of the storage subsystem and between the storage and loading subsystems. This refers to transporting the products from six sets of sources: {A, B (including its three subsets), C, D} whose capacity belongs to the set of capacities {C1, C2} to the set of destinations {B, trucks loading set, vessels loading set} whose capacity belongs to the set of capacities {C1, C2, C3, C4} Given that: C3 <C4 <C1 <C2. Thus, making a combinatorial game of very complicated routing conveyors. To fully understand the matrix of conveyor routes, we have classified the routes into ten types. Each type composes a set of routes with the same source set, the same destination set and whose maximum capacity is equal to the minimum capacity of the source and the destination. This will contribute in reducing the complexity while generating the routing plan. All of these ten routes classes (figure 2) include:

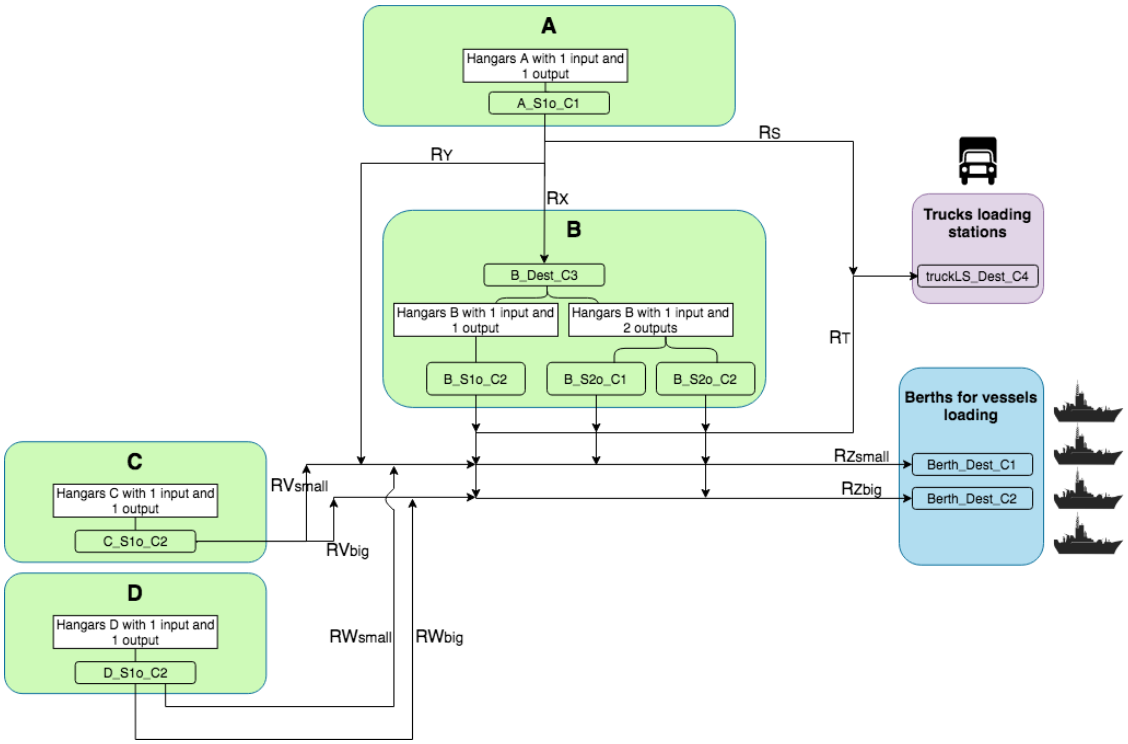


Figure 2 : The ten types of routes of the belt-conveyor paths matrix

- **Rx:** the routes formed from the exits of the hangars of set A, to the entrances of set B with a capacity C3.
- **Rs**: the routes formed from the exits of the hangars of set A, to trucks stations with a C4 capacity.
- **Ry**: the routes formed from the exits of the hangars of set A, to the berths gantry cranes with C1 capacity.
- **Rt**: the routes formed from the exits of the hangars of set B (the three sub-sets of B included), to trucks stations with C4 capacity.
- **Rz_{small}**: the routes formed from the exits of the hangars of set B (the three subsets of B included), to the berths gantry cranes with capacity C1. The term "small" refers to the fact that loading of ships is possible on two capacities: C1 and C2. Except that C1 is smaller than C2.
- **Rz_{big}**: the routes formed from the exits of the hangars from set B (only two subsets of B included: hangars with only one exit with capacity C2, and hangars with 2 exits and precisely from exits whose capacity is C2), up to ship berths gantry cranes with capacity C2. The term "big" refers to the fact that loading of ships is possible on two capacities: C1 and C2. And C2 is the maximum capacity.
- **Rv_{small}**: the routes formed from the exits of the hangars of set C to the berths gantry cranes of ships with a capacity of C1.
- **Rv_{big}**: the routes formed from the exits of the hangars from set C to the berths gantry cranes with C2 capacity.
- **Rw_{small}:** the routes formed from the exits of the hangars of set D to the berths gantry cranes with C1 capacity.
- **Rw_{big}:** the routes formed from the exits of the hangars of set D to the berths gantry cranes with C2 capacity.

The combination of these paths has of course given possible overlaps within each type of routes and between different types.
The possible overlaps between routes of different types are illustrated in table 1.

Table 1 : Overlaps between routes

Routes type		**Itinerary**	**Overlap with**
Routes S (R_S)		A – Trucks loading stations	R_S, R_T, R_X, R_Y, $R_{Z_{small}}$ and $R_{Z_{big}}$
Routes T (R_T)		B – Trucks loading stations	R_T, R_S, $R_{Z_{small}}$, $R_{Z_{big}}$ and R_Y
Routes X (R_X)		A – B	R_X, R_Y, R_S
Routes Y (R_Y)		A – Loading berths with capacity C1	R_Y, R_S, R_X, R_T, $R_{Z_{small}}$, $R_{Z_{big}}$, $R_{V_{small}}$, $R_{W_{small}}$
Routes Z	Routes Z_{small} ($R_{Z_{small}}$)	B – Loading berths with capacity C1	$R_{Z_{small}}$, $R_{Z_{big}}$, R_S, R_T, R_Y, $R_{V_{small}}$,$R_{W_{small}}$
	Routes Z_{big} ($R_{Z_{big}}$)	B – Loading berths with capacity C2	$R_{Z_{big}}$, $R_{Z_{small}}$, R_S, R_T, R_Y, $R_{V_{big}}$
Routes V	Routes V_{small} ($R_{V_{small}}$)	C – Loading berths with capacity C1	$R_{V_{small}}$, $R_{V_{big}}$, R_Y, $R_{Z_{small}}$, $R_{W_{small}}$
	Routes V_{big} ($R_{V_{big}}$)	C – Loading berths with capacity C2	$R_{V_{big}}$, $R_{V_{small}}$, $R_{Z_{big}}$, $R_{W_{big}}$
Routes W	Routes W_{small} ($R_{W_{small}}$)	D – Loading berths with capacity C1	$R_{W_{small}}$, R_Y, $R_{Z_{small}}$, $R_{V_{small}}$
	Routes W_{big} ($R_{W_{big}}$)	D – Loading berths with capacity C2	$R_{W_{big}}$, $R_{V_{big}}$

4 INTEGRATION APPROACH AND ROUTING OPTIMIZATION DISCUSSION

In this paper, we report that optimization problems especially those that comprise a number of sub-problems, could be approached otherwise than in classical methodology. The latter consists of formulating the subproblems into one mathematical model, which will yield to many complications we will bother to resolve afterwards, such as: getting optimal results in enormous response time or may be no optimal results at all. Even if they are gathered in one mathematical model, we may not be exhaustive in terms of real-world use cases. In either case, there will be massive work to put in while designing a resolution method. We suggest that we can approach such optimization problems by considering sub-problems of the global problem and formulate each sub-problem into one mathematical model. Each one will be bound to give optimal plans feasible for other sub-models. However, there is an urge for a coupling strategy to consider between the sub-problems in order to avoid quasi-infinite interaction loops. An important word of caution, the decision variables, objective functions and constraints of each sub-model should not be redundant with those of the other sub-models. As the matter of fact, they should be consistent between each other. For instance, in our case, the global objective is to maximize the loading volume. Therefore, the loading sub-model will first generate optimal loading plans in such a way to maximize the loading volume. The stocking/reclaiming and routing sub-models on the other hand should have objective functions that lead to maximize the loading volume.

Furthermore, the routing sub-model could not generate optimal plans given only the loading plans which advise the routing sub-model on the destination i.e., to which transport the product, but it also needs to get the stocking/reclaiming plans as input to know the source from which the routing sub-model can take the product. So, the routing problem comes the last one on the decision process which can save the routing problem for many decisions. The decisions of the routing problem will be broken down into a small number of constraints. In fact, this will allow the routing problem to focus on real aspects of a routing problem, namely the sophisticated conveyor-routes matrix and the configurations of the qualities to be loaded. For example, to serve a demand whose qualities can be loaded at the same time or successively. So, the routing sub-model would receive the planning of demands from the loading and stocking sub-systems, where each demand is characterized by a list of qualities (products) that should be transported to a destination. The time window of each demand is known, as well as the source and destination of each quality that make us define the subset of routes $\boldsymbol{R_k}$ (R_S, R_T , R_X, R_Y, $R_{Z_{small}}$,$R_{Z_{big}}$, ,$R_{W_{small}}$,$R_{W_{big}}$, $R_{V_{big}}$, $R_{V_{small}}$) rather than the whole set $\boldsymbol{R}$. The routing sub-optimizer aims to find for all demands, the routes that minimize the sum of tardiness penalties and waiting costs. Hence, for each logistics operation, the optimal path can be selected from a subset of routes instead of all of the routes set. We hypothesize that selecting routes from smaller sets will accelerate the response time.

5 CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In this paper, we presented the spirit of the integration approach of bulk port operations planning and scheduling decisions. The integration approach implies that the global port optimization problem is decomposed into four sub-problems, then the four resulted planning sub- systems interact with each other in a way that retains coherence between the sub-optimizers and avoids any eventual decision redundancy between them. Thanks to this approach many constraints can be relaxed in the routing model. In the literature review, some authors studied the integrated routing-stock problem, which makes the formulation more complex. However, in our case, the extra decisions related to the stock nor those of the loading do not need to be modeled, because these decisions are already dealt with by the stock and the loading sub-optimizers respectively. The idea is to get each sub-problem deal with its own decisions; first the loading sub-optimizer handles many decisions, then comes the stock sub-optimizer that has other decisions left. As a result, the routing sub-optimizer has less decisions to do and focuses only on the significant complexity of a real industrial belt- conveyor paths matrix with routes conflicts included. The future work, we will propose a mathematical model formulation of the routing problem to verify the hypotheses we talked about in the discussion.

REFERENCES

[1] Mallah S. and Aloullal. A., Kamach O., Kouiss K., Najid N., Deshayes L., 2020. A Novel integration approach for a complex supply chain optimization problem in an export bulk port. 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT).

[2] G. C. Menezes, G. R. Mateus, M. G. Ravetti, "A branch and price algorithm to solve the integrated production planning and scheduling in bulk ports", 2017. European Journal of Operational Research 258, 926–937.

[3] Hayashi M. et al., A solution Method for an Assignment and Routing Problem of Vehicles for a Container Yard, Transaction of the society of Instruments and Control Engineers, Vol. 40, No. 11 (2004), pp. 1140-1147.

[4] Nishimura, E. et al, Rard Trailer Routing at a Machine Container Terminal, Transportation Research, Part E, Vol. 41, No. 1 (2005), pp. 53-76.

[5] Avella, P. et al., Solving a fuel delivery problem by heuristics and exact approaches. European Journal Operational Research, Vol. 152, No. 1 (2004), pp. 170-179.

[6] Kim, K.H. and Kim K. Y., Routing Straddle Carriers for the Loading Operation of Containers using a Beam Search Algorithm, Computers and Industrial Engineering, Vol. 36, No. 1 (1999), pp. 109-136.

[7] Tilk C. and Goel A., Bidirectional labeling for solving vehicle routing and truck driver scheduling problems. European Journal of Operational Research. Volume 283, Issue 1, 16 May 2020, Pages 108-124.

[8] M. Ago, T. Nishi, M. Konishi, "Simultaneous Optimi- zation of Storage Allocation and Routing Problems for Belt-conveyor Transportation", January 2007. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manu- facturing 1(2):250-261.

[9] F. Xhafa, and A. Abraham. Metaheuristics for sched- uling in industrial and manufacturing applications. Vol. 128. Springer, 2008.

ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE POUR L'AIDE À LA REPLANIFICATION EN HORIZON GLISSANT D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE

S. TISS, J. LAMOTHE

Centre Génie Industriel, IMT Mines Albi
Albi, France
sanaa.tiss@mines-albi.fr, jacques.lamothe@mines-albi.fr

C. THIERRY

Université de Toulouse, IRIT
Toulouse, France
caroline.thierry@univ-tlse2.fr

RÉSUMÉ : *Dans une chaîne logistique constituée d'unités de fabrication et de distribution indépendantes, chaque maillon planifie ses activités et partage ses plans avec les autres partenaires afin d'aligner leurs planifications et éviter les ruptures en bout de la chaîne. Dans cet article, nous adoptons le point de vue d'un planificateur de distribution centrale qui se situe entre la production et des centres de distributions locaux. Dans le contexte d'une planification tactique à horizon glissant, ce dernier modifie sa planification afin de l'adapter aux événements et aléas de la semaine. Cela peut augmenter significativement la nervosité du système de planification et le besoin d'agilité et flexibilité au sein de la chaîne logistique. La nervosité des décisions des autres planificateurs de la chaîne est vue comme source d'incertitude pour sa planification. Ainsi, nous considérons l'incertitude sur les demandes de ses clients et sur les réceptions prévues de ses fournisseurs. Nous proposons une évaluation possibiliste des risques et de la robustesse de ces plans de livraisons sous incertitude, dans un cadre d'aide à la décision.*

MOTS-CLÉS : *Ensembles Flous, Évaluation des Risques, Robustesse, Planification Tactique, Chaîne Logistique, Nervosité, Aide à la Décision.*

1 INTRODUCTION

Le défi principal d'une planification est de prévoir une activité future sur un horizon de temps. Ce défi s'accroît lorsque plusieurs acteurs doivent se coordonner pour réaliser la planification des activités d'une chaîne logistique (SC) composée de maillons indépendants.
La planification de la production est généralement assurée par un ensemble de modules MRP (Manufacturing Resource Planning) (Adams and Cox, 1985). Pour la planification des opérations de distribution, les entreprises disposant de produits "Make-To-Stock" se basent généralement sur des processus de planification de type DRP (Distribution Resource Planning) (Martin, 1992).

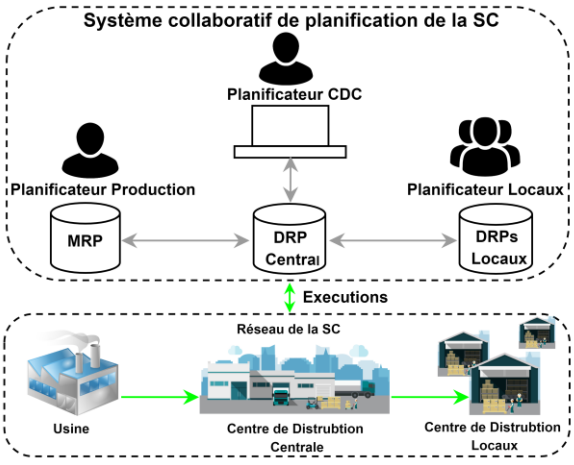


Figure 1 : Chaîne logistique (SC)

Au niveau tactique, chaque acteur modifie sa planification afin de s'adapter aux évènements non prévus ou pour assurer la synchronisation de son activité avec le reste de la chaine. L'effet de ces modifications se propage dans la chaîne et peut augmenter la nervosité du système de planification (effet Bulwhip).

Pour la suite de cet article, nous focalisons sur la planification de la distribution centrale ayant les unités de fabrication comme fournisseurs et les unités de distribution locales comme clients (voir figure1). Nous avons pour objectif d'évaluer les risques de non-maintien de la promesse de livraison d'un décideur en horizon glissant ainsi que la robustesse du plan face aux incertitudes sur la demande et les réceptions prévues.
Nous présenterons d'abord les travaux de la littérature adressant des problèmes de la planification sous incertitude. Ensuite, nous modéliserons le problème et les contraintes considérées. Enfin, nous présenterons notre approche pour aider à la replanification en évaluant les risques et la robustesse des plans et nous finirons l'article avec un exemple illustratif de cette évaluation.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans la littérature, les notions de nervosité, e.g. (de Kok and Inderfurth, 1997), et de robustesse, e.g. (Goren and Sabuncuoglu, 2008), sont souvent liées à la notion de stabilité.
La nervosité reflète l'**instabilité des variables de décision** d'une planification. Elle est généralement quantifiée par le nombre de changements effectués sur ces variables

au long des cycles de replanification (Ho, 1989). Néanmoins, dans le cadre d'une planification à horizon glissant, nous ne pouvons pas échapper à ce phénomène mais plutôt chercher à l'atténuer. Horizon figé, stock de sécurité, Lot-for-Lot, surestimation des délais, diminution des couts de modification et augmentation de la longueur d'horizon de planification sont des stratégies visant la minimalisation de la nervosité dans la SC (Kadipasaoglu and Sridharan, 1995). D'autres travaux ont pris en compte les incertitudes dans les paramètres de planification pour traiter ce phénomène et évaluer l'effet de ces incertitudes sur la nervosité de système (e.g. (Ho and Ireland, 1998)).

Cependant, la robustesse peut être vue comme une mesure de **stabilité des performances** face à la nervosité des variables de décision. « *A system is known as robust if it makes it possible to obtain a weak dispersion of the target performances in spite of the variations of the level of the noncontrollable decision variables.* » (Genin et al., 2005) Cela justifie le fait que la notion de robustesse est souvent liée à l'analyse des risques et des incertitudes, impactant les performances dans la prise de décision, dans la littérature. (Kleijnen and Gaury, 2003) intègrent l'analyse des risques ou des incertitudes dans leur méthodologie afin de proposer la solution la plus robuste face à la variabilité d'un environnement.

Les incertitudes dans les problèmes de planification de la SC concernent différents paramètres. (Ben Ammar, 2014) identifie quatre catégories principales : délai de livraison incertain et demande déterministe (Dolgui and Ould-Louly, 2002), délai de livraison et demande incertains (Axsater, 2006), demande incertaine (Graves, 2011) et capacité incertaine (Guillaume et al., 2013). La littérature dans cette dernière catégorie est **très limitée**. Peu de travaux ont pris en compte explicitement l'incertitude sur les attendus de livraison et les contraintes de capacité.

Les types de modélisation des incertitudes de ces paramètres dans la littérature sont principalement : 1/ les intervalles, la représentation la plus simple de l'incertitude (Guillaume et al., 2017), 2/ les distributions de probabilité (Birge and Louveaux, 2011), 3/ les fonctions de croyance (Yager and Liu, 2008), 4/ les ensembles flous (Grabot et al., 2005).
La théorie des possibilité et les ensembles flous permettent de modéliser des incertitudes en cas d'insuffisance de données pour déterminer une distribution de probabilité (Guillaume et al., 2011).

Dans notre article, nous modélisons la nervosité des décisions des clients et des fournisseurs en utilisant les ensembles flous. Nous confrontons les plans de livraison déterministes cumulés (décisions) du planificateur de distribution à ces incertitudes afin d'évaluer la robustesse et les risques de ces plans. Nous nous appuyons principalement sur les mesures de la théorie de possibilité pour effectuer cette évaluation. Dans ce contexte, nous mesurons la robustesse d'un plan en évaluant la nécessité qu'il satisfait les objectifs tout en respectant les contraintes (Fargier and Thierry, 2000), malgré l'incertitude de la demande et des réceptions programmées.

3 MODÉLISATION DU PROBLÈME DE DÉCISION SOUS INCERTITUDE

3.1 Problème

Nous nous intéressons à la planification des plans des livraisons clients (voir figure 2).

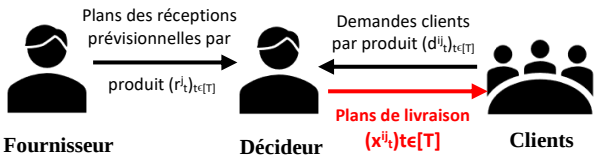


Figure 2 : Processus de décision et notations

Au niveau de centre de distribution central, un décideur gère un grand nombre de références de produits. Le stock d'un produit est partagé entre plusieurs clients. Cela fait de la décision des plans de livraison par produit et par client une décision complexe et multi-contrainte.
Cette décision est susceptible de beaucoup évoluer dans le temps dans un environnement à fortes variabilités.
Au cours du processus de replanification, l'identification des plans risqués qui nécessitent des modifications pour éviter des perturbations et/ou une dégradation importante du taux de service, est complexe dans ce contexte.

Nous modélisons le manque de confiance du décideur dans les plans transmis par les autres partenaires par une incertitude, afin d'évaluer la robustesse de ses décisions et l'aider à replanifier efficacement.

3.2 Notations

Soit {IJ}, l'ensemble des clients i consommant le produit j. [T], l'ensemble des périodes t d'un horizon de planification.
Au niveau du centre de distribution, un décideur reçoit des plans de demandes d'approvisionnement par produit $(d^{ij}_t)_{t\epsilon[T],i\epsilon IJ}$ de la part de ses clients et des plans de réceptions prévisionnelles par produit $(r^j_t)_{t\epsilon[T]}$ de la part de ses fournisseurs dans la chaîne. Ensuite, il décide des plans de livraisons par produit $(x^{ij}_t)_{t\epsilon[T],i\epsilon IJ}$ pour chacun de ses clients.
Soit $(D^{ij}_t)_{t\epsilon[T],i\epsilon IJ}$, $(R^j_t)_{t\epsilon[T]}$ et $(X^{ij}_t)_{t\epsilon[T],i\epsilon IJ}$ les plans cumulés des plans $(d^{ij}_t)_{t\epsilon[T],i\epsilon IJ}$, $(r^j_t)_{t\epsilon[T]}$ et $(x^{ij}_t)_{t\epsilon[T],i\epsilon IJ}$, respectivement, calculés pour chaque période, tels que $D^{ij}_t=\sum_{s=1}^{t} d^{ij}_s$, $R^j_t=\sum_{s=1}^{t} r^j_s$, $X^{ij}_t=\sum_{s=1}^{t} x^{ij}_s$. La décision $(x^{ij}_t)_{t\epsilon[T],i\epsilon IJ}$ fait objet de l'évaluation dans les prochaines sections.

3.3 Modèle d'incertitude

Dans l'historique de planification à horizon glissant, nous distinguons les incertitudes dues à des déplacements des

quantités dans le temps entre deux cycles de planification successifs (1) et les incertitudes dues à des modifications effectives de la quantité initialement prévue, pour une période donnée, entre deux cycles de planification successifs (2). Les plans des acteurs de la chaîne incluent les deux types d'incertitudes observés.
À l'aide des plans cumulés, nous filtrons les incertitudes dues aux modifications effectives des quantités prévues.
Il convient donc de noter que l'imprécision des données cumulées est moins importante que la somme des imprécisions des données non cumulées ($\widetilde{Q_t} \leq \sum_{s=1}^{t} \widetilde{q_t}$; respectivement, $\widetilde{q_t}$ *et* $\widetilde{Q_t}$ sont la quantité incertaine planifiée à la période t et la quantité cumulée incertaine planifiée à la période t).

Une représentation trapézoïdale peut être utilisée pour modéliser une information incomplète graduelle concernant une quantité planifiée incertaine $\widetilde{Q_t}$.
Q_t est la quantité réellement transmise par un acteur. Elle se situera dans l'intervalle expert le plus possible [Q_{min},Q_{max}] (voir figure 3). Un cas particulier est de considérer la valeur transmise comme la valeur la plus possible dans l'intervalle possible [Q_{min},Q_{max}] ce qui revient à une représentation triangulaire. C'est cette représentation que nous utiliserons dans la suite de cet article pour des raisons pédagogiques.

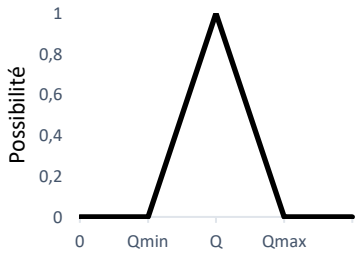


Figure 3 Distribution de possibilité triangulaire

3.4 Contraintes considérées

Sur l'horizon de planification, nous distinguons trois zones : gelée, flexible et libre (Chapman and Clive, 2007). Dans l'horizon gelé, les changements de planification ne sont pas autorisés sauf avec approbation exceptionnelle du décideur. L'horizon flexible est une zone de compromis et de négociations. Enfin, dans la zone libre, les modifications sont acceptées automatiquement dans les limites définies.

En général, les perturbations les plus importantes se trouvent au niveau de la zone flexible de planification en s'approchant de la date de réalisation. D'où notre intérêt à évaluer les décisions de cette zone face aux incertitudes pour augmenter leur robustesse. Nous considérons les incertitudes sur les demandes et les réceptions de la zone flexible de la planification.

Le maintien de la promesse de livraison $(x_t^{ij})_{t\in[T],i\in IJ}$ sur les différents cycles de planification jusqu'à sa réalisation dépend principalement de la disponibilité des quantités prévisionnelles dans le stock (Contrainte (C1)). Cependant, la satisfaction des clients augmente en minimisant l'écart entre cette promesse et la demande de ces clients (Contrainte (C2)).

Pour la suite nous nous basons sur les mesures de la théorie de possibilité, liées aux demandes et réceptions cumulées floues, pour faire une évaluation possibiliste de deux risques principaux, risque de rupture et risque d'insatisfaction client, liés aux contraintes C1 et C2 respectivement ainsi que la robustesse des plans de livraisons.

4 ÉVALUATION DES RISQUES ET DE LA ROBUSTESSE DE PLANIFICATION

4.1 Mesures en théorie de possibilité

La nécessité et la possibilité d'un évènement A sont les deux mesures principales décrivant l'incertitude de cet évènement à partir d'une distribution de possibilité (Zadeh 1965).
La possibilité Π(A) évalue à quel point l'évènement A est possible, telle que :

$$\Pi(A) = \sup_{x\in A}\big(\pi(x)\big) \quad (1)$$

La nécessité N(A) évalue à quel point l'évènement A est nécessaire (certain) et elle est liée à la mesure de possibilité par la propriété de dualité (contrairement aux probabilités autoduales, $P(A) = 1 - \mathrm{P}(A^C)$) suivante :

$$N(A) = 1 - \Pi(A^C) = \inf_{x\notin A}\big(1 - \pi(x)\big) \quad (2)$$

Ces mesures satisfont les conditions de normalisation suivantes :

$$\Pi(A) + \Pi(A^C) \geq 1 \quad (3)$$

$$\mathrm{N(A)} \leq \Pi(A) \quad (4)$$

$$\forall \mathrm{A,B} \subseteq \mathrm{S}, \Pi(\mathrm{A} \cup \mathrm{B}) = \max(\Pi(\mathrm{A}), \Pi(\mathrm{B})) \quad (5)$$

$$\forall \mathrm{A,B} \subseteq \mathrm{S}, \mathrm{N}(\mathrm{A} \cap \mathrm{B}) = \min(\mathrm{N(A)}, \mathrm{N(B)}) \quad (6)$$

k est un nombre précis, les mesures de possibilité et de nécessité de l'évènement 'x ≥k' et de l'évènement 'x≤k' sont les suivantes :

$$\Pi(\mathrm{x} \geq \mathrm{k}) = \Pi(\mathrm{x} \in [k, +\infty[) = \sup_{\mathrm{x}\geq\mathrm{k}}\big(\pi(x)\big) \quad (7)$$

$$\Pi(\mathrm{x} \leq \mathrm{k}) = \Pi(\mathrm{x} \in]-\infty, \mathrm{k}]) = \sup_{\mathrm{x}\leq\mathrm{k}}\big(\pi(x)\big) \quad (8)$$

$$\mathrm{N}(\mathrm{x} \geq \mathrm{k}) = 1 - \Pi(\mathrm{x} < \mathrm{k}) = \inf_{\mathrm{x}<\mathrm{k}}\big(1 - \pi(x)\big) \quad (9)$$

$$\mathrm{N}(\mathrm{x} \leq \mathrm{k}) = 1 - \Pi(\mathrm{x} > \mathrm{k}) = \inf_{\mathrm{x}>\mathrm{k}}\big(1 - \pi(x)\big) \quad (10)$$

4.2 Évaluation des risques

Le risque est défini comme « effet de l'incertitude sur les objectifs » selon la norme (ISO 31000(fr), 2018). Ainsi, dans cet article, nous mesurons l'effet de l'incertitude de la demande et celle des réceptions sur la satisfaction des contraintes C1 et C2.

K1 est le risque de rupture dû à l'insatisfaction de la contrainte C1 face aux incertitudes sur les réceptions. K2 est le risque d'insatisfaction client dû à l'insatisfaction de la contrainte C2 face aux incertitudes sur les demandes. La mesure d'un risque lié à un événement 'A' porte sur la mesure du couple (N(A), Π(A)).

Soit S_t^j, le stock projeté de la période t du produit j. Sans perte de généralité, nous considérons le stock initial inclus dans r_0^j. Nous utilisons les données cumulées pour le calcul du stock projeté, tel que :

$$S_t^j = \mathrm{R}_t^j - \mathrm{X}_t^j \quad (11)$$

Pour une période t ∈ $[T]$, la possibilité et la nécessité de rupture (insatisfaction de la contrainte C1 ($\overline{C1}$)), lié à la décision précise de livraison totale cumulée X_t^j sont calculées comme suit :

$$\Pi(\overline{C1})_t = \Pi(S_t^j < 0) = \Pi(\mathrm{R}_t^j < \mathrm{X}_t^j) \quad (12)$$

$$\mathrm{N}(\overline{C1})_t = \mathrm{N}(S_t^j < 0) = \mathrm{N}(\mathrm{R}_t^j < \mathrm{X}_t^j) \quad (13)$$

Le **risque K1 de rupture** lié à la période t, est noté K1(t), tel que :

$$\mathrm{K1(t)} = (\Pi(\overline{C1})_t ; \mathrm{N}(\overline{C1})_t) \quad (14)$$

Par objectif de simplification, nous négligeons le risque de sur stockage et nous considérons que les clients ont une capacité de stockage infini. Un client (i) est satisfait si la quantité de livraison, précise, promise X_t^j pour une période t répond au moins à sa demande D_t^{ij}. Nous évaluons la possibilité et la nécessité d'insatisfaction d'un client i (insatisfaction de la contrainte C2 ($\overline{C2}$)) comme suit :

$$\Pi(\overline{C2})_{i,t} = \Pi(\mathrm{D}_t^{ij} > \mathrm{X}_t^{ij}) \quad (15)$$

$$N(\overline{C2})_{i,t} = \mathrm{N}(\mathrm{D}_t^{ij} > \mathrm{X}_t^{ij}) \quad (16)$$

Le **risque K2 d'insatisfaction** lié à la période t et un client i est noté K2(t,i), tel que :

$$\mathrm{K2(t,i)} = (\Pi(\overline{C2})_{i,t} ; N(\overline{C2})_{i,t}) \quad (17)$$

Les deux graphiques ci-dessous montrent la répartition des risques K1(t) et K2(t,i) selon les décisions X_t^j et X_t^{ij} par rapport respectivement aux distributions de R_t^j et D_t^{ij}.

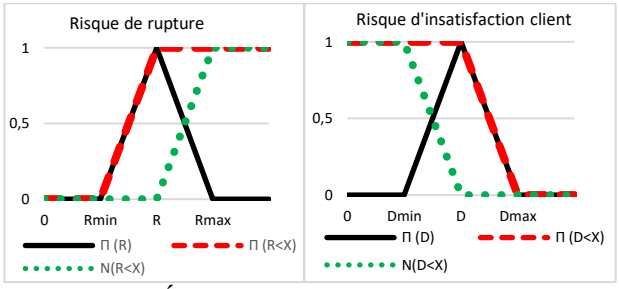


Figure 4 : Évaluation des risques K1(t) et K2(t,i)

Promettre une quantité, X_t, pour la livraison des clients qui dépasse la quantité prévisionnelle en stock, ou promettre une quantité inférieure aux demandes clients, implique un risque de ne pas tenir cette promesse dans les prochains cycles de planification.

Ainsi, nous agrégeons les deux risques K1(t) et K2(t,i) en un **risque « global »**, $K_{tot}(t, IJ)$, évaluant le risque de non maintien de la promesse, ($\overline{C}$), de la décision totale X_t^j pour une période t, tel que :

$$K_{tot}(t, IJ) = (\Pi(\overline{C})_{t,IJ} ; \mathrm{N}(\overline{C})_{t,IJ}) \quad (18)$$

Avec :

$$\Pi(\overline{C})_{t,IJ} = \Pi\left((\overline{C1})_t \cup (\overline{C2})_{t;IJ}\right)_t \quad (19)$$
$$= \Pi((\mathrm{R}_t^j < \mathrm{X}_t^j) \cup (\mathrm{D}_t^j > \mathrm{X}_t^j))$$

$$\mathrm{N}(\overline{C})_{t,IJ} = \mathrm{N}\left((\overline{C1})_t \cup (\overline{C2})_{t;IJ}\right)_t \quad (20)$$
$$= \mathrm{N}((\mathrm{R}_t^j < \mathrm{X}_t^j) \cup (\mathrm{D}_t^j > \mathrm{X}_t^j))$$

La **gravité (G) du risque « global »** du plan $(X_t^j)_{t\in[T]}$ peut ainsi être mesurée en terme de nécessité maximale du risque mesurée sur les périodes t∈[T], tel que :

$$G = \max_{t\in[T]}(N(\overline{C})_{t,IJ}) \quad (21)$$

Soit [N] un ensemble de périodes t de taille **N**, tel que :

$$[\mathrm{N}] \subset [\mathrm{T}], \forall \mathrm{t} \in [\mathrm{N}],\ \Pi(\overline{C})_{t,IJ} > 0 \quad (22)$$

La **fréquence (F) d'apparition du risque « global »** le long de l'horizon [T] du plan $(X_t^j)_{t\in[T]}$, peut être exprimée comme suit :

$$\mathrm{F} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{T}} \quad (23)$$

D'autre part, nous considérons un risque global comme évitable si une opération de lissage du plan peut être suffisante pour la satisfaction des contraintes. Ce lissage est possible si la quantité totale promise X_T^j à la dernière

période T, est exécutable avec des réceptions totales cumulées programmées R_T^j et si elle satisfait la quantité totale demandée cumulée D_T^j . Ainsi, nous évaluons **l'adaptabilité d'un plan (A)** comme suit :

$$A((X_t^j)_{t\epsilon[T]}) = \Pi((R_T^j \geq X_T^j) \cap (D_T^j \leq X_T^j)) \qquad (24)$$

4.3 Évaluation de la robustesse

Nous évaluons la robustesse d'un plan comme étant le degré de certitude de satisfaction des contraintes (C1 et C2) simultanément, malgré les incertitudes sur R_t^j et D_t^j, telle que :

$$\begin{aligned} Rob(X_t^j) &= N\left((R_t^j \geq X_t^j) \cap (D_t^j \leq X_t^j)\right) \qquad (25)\\ &= \min\left(1 - \Pi(R_t^j < X_t^j); 1 - \Pi(D_t^j > X_t^j)\right) \end{aligned}$$

Nous agrégeons l'évaluation de la robustesse globale du plan $(X_t^j)_{t\epsilon[T]}$ sur l'horizon [T], comme suit :

$$\begin{aligned} Rob((X_t^j)_{t\epsilon[T]}) &= \cap_{t\epsilon[T]} Rob(X_t^j) \qquad (26)\\ &= min_{t\epsilon[T]} Rob(X_t^j) \end{aligned}$$

La Figure 5 résume sur le même graphe les évaluations des risques et de la robustesse d'une décision X_t^j à partir des mesures de possibilité et nécessité en termes de satisfaction des contraintes C1 et C2, pour un scénario des distributions floues de R et D, tel que : $D < R_{min} < D_{max} < R$

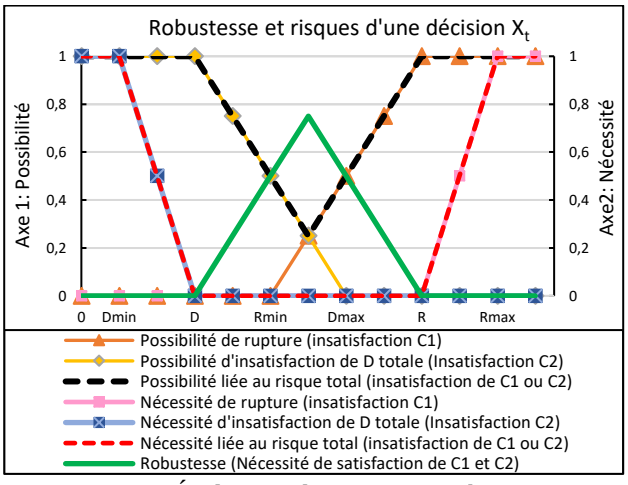


Figure 5 : Évaluation des risques et robustesse

4.4 Arborescence d'évaluation de criticité des plans

La norme (ISO 13849-1, 2008) définit l'arborescence classique d'évaluation des risques. Cette évaluation est basée sur trois niveaux principaux : la gravité du risque puis sa fréquence et finalement la facilité à l'éviter. En s'appuyant sur ce principe, nous proposons dans cette section une évaluation arborescente permettant de classer les plans par produit, $(X_t^j)_{t\epsilon[T]}$, en fonction de l'évaluation du risque global afin d'aider le décideur à identifier les plans de livraison les plus critiques.

L'arborescence est constituée de quatre niveaux. D'abord, nous filtrons les plans robustes qui satisfont les contraintes de manière plus ou moins certaine. Puis, les plans les plus contraignants font l'objet d'évaluation possibiliste en termes de gravité, fréquence et adaptabilité par rapport au risque global (voir les sections 3.2 et 3.3).

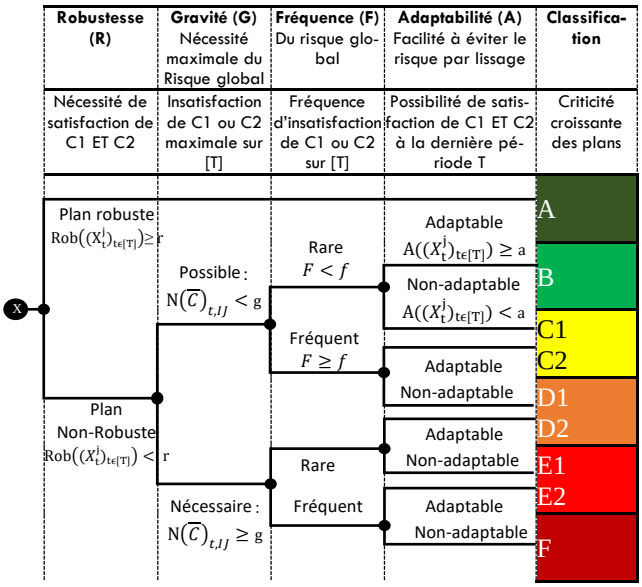


Figure 6 : Arborescence d'évaluation des plans /produit

Sur le premier niveau d'évaluation de la robustesse des plans (éq. (26)), le décideur peut paramétrer r afin de jouer sur les tolérances de son système et filtrer les plans les moins robustes en augmentant le r, pour ensuite détailler leur évaluation en terme de risque global et les classer selon leur criticité. Il a aussi le choix de définir la longueur T de l'horizon de planification à évaluer ainsi que le paramétrage des niveaux d'évaluation qui suivent.

Au niveau de l'évaluation de la gravité du risque global (éq.(21)), Le plan est considéré plus critique si le risque global maximal est sûr (nécessaire).
Ensuite, au niveau d'évaluation de la fréquence du risque global (F) (éq. (23)) le décideur peut aussi définir la valeur de référence f.
Finalement, nous évaluons la facilité à éviter le risque global en mesurant l'adaptabilité du plan (éq. (24)).

Le résultat de l'évaluation se présente dans la matrice ci-dessous (Figure 7). Les plans des produits (P_i) sont positionnés dans la matrice selon leur criticité en termes d'insatisfaction des contraintes. Les plans robustes sont également facilement identifiables sur la matrice.

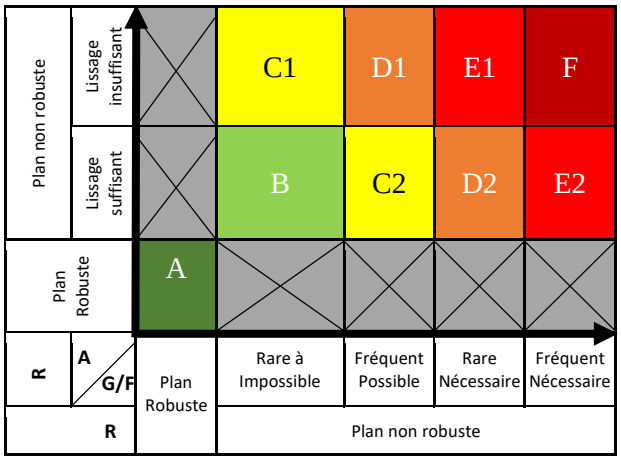


Figure 7 : Matrice de criticité des plans par produit

5 EXEMPLE ILLUSTRATIF

5.1 Données

Nous considérons les données cumulées de planification de trois produits (P1, P2 et P3). Le stock de chaque produit est partagé entre deux clients (C1 et C2).
La planification de la distribution des trois produits se fait sur un horizon de cinq périodes (t1, t2, t3, t4, t5).

Les tableaux 1, 2 et 3 présentent les plans cumulés flous des demandes clients des produits P1, P2 et P3, respectivement. Les plans flous sont présentés sous forme du triplet (Dmin ; D ; Dmax).

- Produit P1 :

Période / Demande /client	t1	t2	t3	t4	t5
D (Cl)	(45 ;50 ; 55)	(116 ;15 0 ;185)	(160 ;20 0 ;240)	(320 ;40 0 ;480)	(400 ;50 0 ;600)
D (C2)	(180 ;20 0 ;220)	(180 ;20 0 ;220)	(320 ;40 0 ;480)	(360 ;40 0 ;440)	(630 ;70 0 ;770)
D_Totale	(225 ;25 0 ;275)	(296 ;35 0 ;405)	(480 ;60 0 ;720)	(680 ;80 0 ;920)	(1030 ;1 200 ;137 0)

Tableau 1 : Plans flous des demandes clients (P1)

- Produit P2 :

Période / Demande /client	t1	t2	t3	t4	t5
D (Cl)	(0 ;100 ; 200)	(50 ;200 ;400)	(100 ;30 0 ;400)	(200 ;40 0 ;500)	(100 ;50 0 ;600
D (C2)	(20 ;50 ; 200)	(50 ;100 ;250)	(100 ;15 0 ;300)	(100 ;20 0 ;400)	(50 ;250 ;500)
D_Totale	(20 ;150 ;400)	(100 ;30 0 ;650)	(200 ;45 0 ;700)	(300 ;60 0 ;900)	(150 ;75 0 ;1100)

Tableau 2 : Plans flous des demandes clients (P2)

- Produit P3 :

Période / Demande /client	t1	t2	t3	t4	t5
D (Cl)	(0 ;0 ;50)	(50 ;200 ;400)	(0 ;400 ; 600)	(100 ;65 0 ;800)	(100 ;65 0 ;1000)
D (C2)	(0 ;50 ;1 00)	(0 ;150 ; 200)	(100 ;15 0 ;300)	(100 ;20 0 ;300)	(100 ;30 0 ;500)
D_Totale	(0 ;50 ;1 50)	(50 ;350 ;600)	(100 ;55 0 ;900)	(200 ;85 0 ;1100)	(200 ;95 0 ;1500)

Tableau 3 : Plans flous des demandes clients (P3)

Le tableau 4 présente les plans cumulés flous des des réceptions prévues des fournisseurs par produit. Les plans flous sont présentés sous forme du triplet (Rmin ; R ; Rmax) des paramètres de la distribution triangulaire de possibilité pour chaque période.

Période / Réceptions / Produit	t1	t2	t3	t4	t5
R (Pl)	(270 ;30 0 ;330)	(450 ;50 0 ;550)	(560 ;70 0 ;840)	(720 ;90 0 ;1080)	(880 ;11 00 ;1320)
R (P2)	(0 ;50 ;1 00)	(50 ;350 ;400)	(100 ;45 0 ;600)	(50 ;550 ;700)	(100 ;85 0 ;900)
R (P3)	(270 ;30 0 ;330)	(600 ;70 0 ;800)	(800 ;90 0 ;950)	(1000 ;1 100 ;120 0)	(1200 ;1 500 ;160 0)

Tableau 4 : Plans flous des réceptions par produit

Les tableaux 5, 6 et 7 présentent les décisions des plans de livraison cumulés à évaluer, de chaque article et pour chaque client (le décideur pourra entrer des plans non cumulés).

- Produit P1 :

Période / Livraisons /client	t1	t2	t3	t4	t5
X (Cl)	100	200	300	400	500
X (C2)	100	220	340	460	580
X_Total	200	420	640	860	1080

Tableau 5 : Plans des livraisons par client et total (P1)

- Produit P2 :

Période / Livraisons /client	t1	t2	t3	t4	t5
X (Cl)	100	200	300	400	500
X (C2)	50	100	150	200	250
X_Total	150	300	450	600	750

Tableau 6 : Plans livraison par client et total (P2)

- Produit P3 :

Période / Livraisons /client	t1	t2	t3	t4	t5
X (Cl)	50	400	500	700	800
X (C2)	100	200	300	300	400
X_Total	150	600	800	1000	1200

Tableau 7 : Plans livraison par client et total (P3)

5.2 Résultats d'évaluation et analyse

5.2.1 Classification des plans de livraison par produit

Nous évaluons les plans de livraison par produit, par rapport au risque global (K_{tot}) de non-maintien de promesse. Les résultats obtenus de cette évaluation par produit, sont les suivants :

Produit	R (r = 0.3)	G (g = 0.5)	F (f = 0.3)	A (a = 0.5)	Classe
P1	0.0	1.0	0.8	0.29412	F
P2	0.0	1.0	1.0	1.0	E2
P3	0.45637	0	0.6	1.0	A

Tableau 8 : Résultats d'évaluation des plans de livraison par produit

Les paramètres (r, g, f, a) présentent le paramétrage initialisé par le décideur pour la classification des plans par produit.
Nous visualisons la classification obtenue des plans par produit dans la matrice ci-dessous :

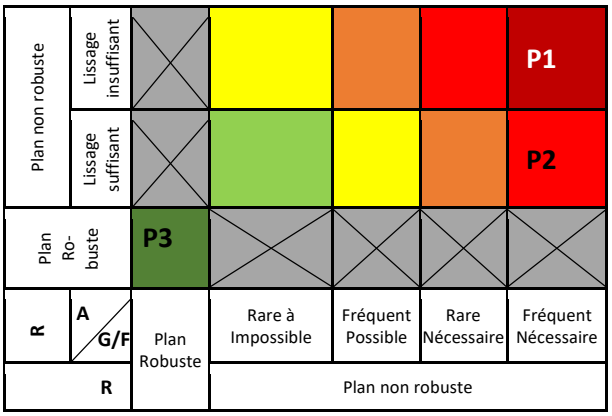


Figure 9 : Résultat de classification des plans par produit dans la matrice de criticité

Le plan de livraison totale du produit P3 est le plus robuste face aux incertitudes des demandes clients et des réceptions programmées du fournisseur. Les quantités totales programmées pour la livraison des clients satisfassent nécessairement les demandes totales ainsi que la contrainte de disponibilité du produit dans le stock.

Le plan de livraison total du produit P2 est identifié comme critique avec un risque fréquent et nécessaire de non-maintien de promesse. Cependant, une opération de lissage des quantités programmées pourra être suffisante pour éviter ce risque.

Le plan de livraison totale du produit P1 est identifié le plus critique avec un risque de non-maintien de promesse de livraison nécessaire et très fréquent. Une opération de lissage des quantités programmées sur l'horizon de planification ne sera pas suffisante pour éviter ce risque.
La matrice amènera vraisemblablement à focaliser sur le produit P1.

5.2.2 Aide à la replanification du plan critique

Pour le produit P1, une visualisation plus détaillée sur les risques apparus pour chaque période est alors proposée (figures 10 et 11).

Les figures 10 et 11 détaillent respectivement l'évaluation du risque de rupture et du risque d'insatisfaction de la demande totale cumulée pour chaque période.

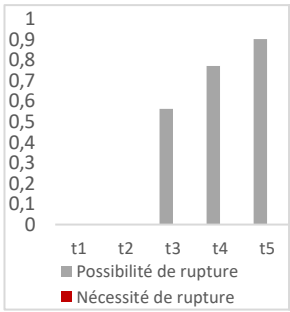


Figure 10 : Risque de rupture par période (P1)

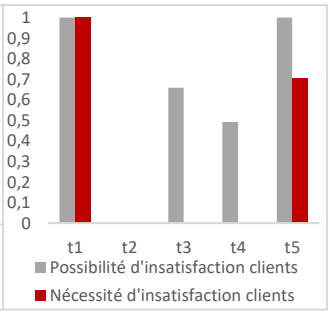


Figure 11 : Risque d'insatisfaction des clients (P1)

À partir de cette évaluation le décideur identifie facilement les périodes t1 et t5 comme des périodes très critiques en termes de satisfaction de la demande totale. Cela oriente ses décisions de modification vers ces deux périodes. Les ajustements aurront comme objectif d'annuler la nécessité d'insatisfaction client.

Afin d'apporter davantage des précisions sur les modifications les plus pertinentes, nous proposons un niveau d'évaluation encore plus détaillé par rapport au risque d'insatisfaction des clients. Les figures 12 et 13 montrent l'évaluation de la satifaction de chaque client partageant le stock du produit P1.

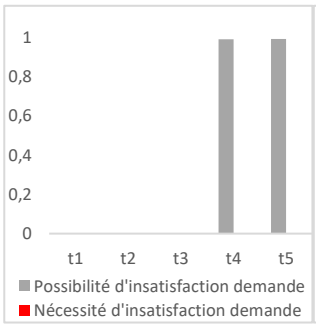


Figure 12 : Risque d'insatisfaction du client 1

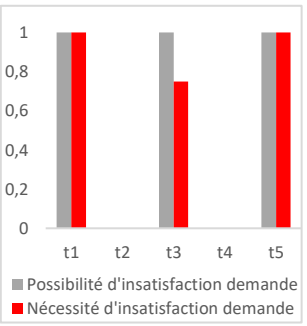


Figure 13 : Risque d'insatisfaction du client 2

L'évaluation du risque d'insatisfaction de chaque demande client cumulée par période, oriente le décideur vers des modifications sur les plans de livraison par client. A partir des résultats des figures 12 et 13, le décideur constatera que les quantités promises à la livraison du client 2 ne satisferont pas les demandes du client 2 des périodes t1, t3 et t5 et que cette insatisfaction est sûre.

Finalement, si le décideur souhaite effectuer des modifications sur les quantités promises au client 2 des périodes t1, t3 et t5. Ces modifications augmenteront nécessairement la performance et la robustesse du plan P1 en termes de satifaction des clients.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La nervosité des demandes des clients et des plans de réceptions des fournisseurs d'un acteur d'une chaîne logistique est considérée comme des incertitudes qui rendent la décision de livraison de ce dernier difficile et instable. Dans cet article, nous aidons ce décideur à prendre en compte ces incertitudes pour évaluer les risques et la robustesse de ses décisions, en utilisant principalement les différentes mesures de la théorie des possibilités.

Nous faisons la différence entre différents niveaux d'agrégation des risques (à la période ou par plan, par client ou par demande totale). Nous avons proposé un outil d'évaluation de la criticité des plans décidés par produit en termes de satisfaction des contraintes considérées. Cela aidera le décideur à éviter les modifications insignifiantes sur les plans robustes et à s'orienter plutôt vers les plans les plus risqués.
Nous pouvons tout à fait étendre ce système et le personnaliser pour l'évaluation des plans par rapport à un risque spécifique.

Pour l'évaluation de la criticité des plans, nous avons considéré la contrainte du maintien de la promesse répondant à la demande totale des clients. La prochaine étape consistera à intégrer une étude d'équité des plans de livraison des clients. La modélisation des préférences de livraison du décideur peut être intégrée dans cette évaluation aussi.

Finalement, un test de l'outil proposé avec un 'Serious Game' est prévu par des décideurs en charge de la planification de la distribution chez le partenaire industriel Pierre Fabre Dermo-Cosmétique.

REMERCIEMENT

Les auteurs souhaitent remercier l'ANR pour le financement du projet CAASC (Cloud Adaptation for Agile SC), Projet-ANR-18-CE10-0012.

REFERENCES

Adams, F. P., and J. F. Cox. 1985. Manufacturing resource planning : An information systems model. *Long Range Planning* 18: 86–92.

Axsater, S. 2006. Planning order releases for an assembly system with random operation times. 2.

Ben Ammar, O. 2014. Planification des réapprovisionnements sous incertitudes pour les systèmes d'assemblage à plusieurs niveaux. thesis. Saint-Etienne, EMSE.

Birge, J. R., and F. Louveaux. 2011. Introduction to Stochastic Programming. Springer Science & Business Media.

Chapman, and Clive. 2007. Introduction to Materials Management. Pearson India.

Dolgui, A., and M.-A. Ould-Louly. 2002. A model for supply planning under lead time uncertainty. *International Journal of Production Economics* 78: 145–152.

Fargier, H., and C. Thierry. 2000. The Use of Possibilistic Decision Theory in Manufacturing Planning and Control: Recent Results in Fuzzy Master Production Scheduling. 15.

Genin, P., S. Lamouri, and A. Thomas. 2005. Impact de l'utilisation d'un plan de référence sur la robustesse de la planification tactique. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)* 39: 777–798.

Goren, S., and I. Sabuncuoglu. 2008. Robustness and stability measures for scheduling: single-machine environment. *IIE Transactions* 40: 66–83.

Grabot, B., L. Geneste, G. Reynoso-Castillo, and S. Vérot. 2005. Integration of uncertain and imprecise ordersin the MRP method. *Journal of Intelligent Manufacturing* 16: 215–234.

Graves, S. C. 2011. Uncertainty and Production Planning. *In* K. G. Kempf, P. Keskinocak, and R. Uzsoy [eds.], Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise: A State of the Art Handbook, Volume 1, International Series in Operations Research & Management Science, 83–101. Springer US, Boston, MA.

Guillaume, R., B. Grabot, and C. Thierry. 2013. Management of the risk of backorders in a MTO–ATO/MTS context under imperfect requirements. *Applied Mathematical Modelling* 37: 8060–8078.

Guillaume, R., C. Thierry, and B. Grabot. 2011. Modelling of ill-known requirements and integration in production planning. *Production Planning & Control* 22: 336–352.

Guillaume, R., C. Thierry, and P. Zieliński. 2017. Robust material requirement planning with cumulative demand under uncertainty. *International Journal of Production Research* 55: 6824–6845.

Ho, C.-J. 1989. Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. *International Journal of Production Research* 27: 1115–1135.

Ho, C.-J., and T. C. Ireland. 1998. Correlating MRP system nervousness with forecast errors. *International Journal of Production Research* 36: 2285–2299.

Kadipasaoglu, S. N., and V. Sridharan. 1995. Alternative approaches for reducing schedule instability in multistage manufacturing under demand uncertainty. *Journal of Operations Management* 13: 193–211.

Kleijnen, J. P. C., and E. Gaury. 2003. Short-term robustness of production management systems: A case study. *European Journal of Operational Research* 148: 452–465.

de Kok, T., and K. Inderfurth. 1997. Nervousness in inventory management: Comparison of basic control rules. *European Journal of Operational Research* 103: 55–82.

Martin, A. J. 1992. DRP: Distribution Resource Planning: The Gateway to True Quick Response and Continuous Replenishment. John Wiley & Sons.

Yager, R. R., and L. Liu eds. . 2008. Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Participants

A. SEDQUI	BENABDELHAFID
abbassi abderrahman	Benabdellah Abla
Abdelhamid BERDAI	BENBDELHAFID
Abderrahman EL MHAMEDI	Benchekroun
Abderrahmane Faker	BENNOURI.Jalila DR.Agadir
Abdul-Nour, Georges	Benoit EYNARD
ADAM Aurélien	Benyoucef
Adnène Hajji	Bergeron, Erik
Ahlam AZZAMOURI	Bernard Grabot
ahmed	Blouin, Florence
aicha	BONNARD Cyril
Aicha Lmj	BOUHADDOU IMANE
Aime Nyoungue	Boukhadeja
AIT MALEK Hasnaa	Boukherroub, Tasseda
Alexandre DOLGUI	BOUNOUAR Mouad
Alice BERTHIER	Βρασίδας-Ιωάννης Λεώπουλος
amal gouiaa	Bruno Agard
Amel Ben Mabrouk	Bruno DAILLE-LEFEVRE
Amin Yazdani	Cedric Join
Aminu Sahabi Abubakar	Cheik OUEDRAOGO
Amir	Cheik
AMRI Chaimaa	DAMIEN LOVATO
Anas	Daniel Roy
Anes	DANTAN Jean-yves
Anes Ben fradj	Daoud Aït-Kadi
Angeliki Deligianni	Derrouiche Ridha
Anis Chelbi	Dorgham Khouloud
Antoine Pierné	Dr. Liaqat Ali
Armand BABOLI	Dzmitry KUCHARAVY
Armand TOGUYENI	EDOUARD Aurélie
Asma RAKIZ	EINABADI Behnam CNH Industrial
Asmaa	EL ADRAOUI
Audrey	EL HASSAN LAAZIZ
Audy, Jean-Francois	EL KIHEL Yousra
AYMEN (Invité)	Elbounjimi, Mbarek
AYMEN ALOUI	Elise Vareilles ISAE SUPAERO
AYOUB NOKRA	Elyes Lamine ISIS
Barrios Piers	EM.KIBBOU
Baudouin Dafflon	Emad Alenany
BEN MECHLIA MALEK	Etienne Valette
FAKER Abderrahmane	KHEZRI Amir Hossein

Farouk Yalaoui	khouloud dorgham
Forget, Pascal	Klement Nathalie
FOTSOH Erica	Κωνσταντίνος Κηρυττόπουλος
François Vernadat	laaziz
frederic Dugardin	Lahcen MIFDAL
Georgios Chatzistelios	Lahcen Tamym
GHERNAOUT Ikram	Lamia BERRAH
Gilles	LAMOURI Samir
GODOT Xavier	Latifa BENHAMOU
GOMEZ ECHEVERRI JUAN-CAMILO	Laure SIRET
Guillaume DESSEVRE	Leah Rifi
HAFIDA BOULOIZ	Lina NACIRI
Haitao Ji 来宾	Lionel Amodeo
Hajar El Mejjad	Loic Parrenin
Hamidreza REZAEI	Loison Francois
Hamza BOUZEKRI	Ludwig Dumetz
Hedi ZIDI	MAFAYOUX JENNY
Hicham Chehade	Maha Ben Ali
Hichem HADDOU BENDERBAL	Mahjoub EL Mountassir
Hind Bril El Haouzi	Malek Masmoudi
HOMRI Lazhar	Manal Hader
HP	Maria Di Mascolo
Ilhem SLAMA	Mariam Atwani
ilias Majdouline	Mariam BOUZID
IMAD EL ADRAOUI	Marjan Padidar
Imen Chaabouni	MARSOT J INRS
Ines Dammak	MARTIN Patrick
Jacques Lamothe	Maryem BOUZOUBAA
Jean-Sébastien Tancrez	marzieh.ghiyasinasab
JIANG Jindong	Mayssa CHEBBI
JinChen 来宾	Mehrnoosh MOHAMMADI
Joanna DAABOUL	mery ben
Jonathan Gaudreault	Meryem GALLAB
K. Medini	Michel ALDANONDO
KAMACH Oualid	Modji
Kamar	Mohamed Ali Kammoun
Kaoutar Chargui	Mohamed Sameh Belaid
khalid KOUISS	Mohamed Zied Torkhani
khalil ALOUI	Mohssine NALI
Khalil Bouramtane	Mojtaba
kharraja	Morad Assid
KHELLAF WALID	Mouad Benbouja
Mouna BAMOUMEN	Ridha Derrouiche
MRABTI Nassim	Robert Pellerin

Mustapha EL MARZOUGUI	Rod
Nabil MOUTTAKI	Romain GUILLAUME
Nadia Hamani	Ronald Mauricio Martinod Restrepo
Najat BARA	Rony DJEUNANG
Najeh Dammak	ROTHER Eva CNH Industrial
Najoua ALAOUI	Sabah BELIL
Nancy PRIOUX	saf elk
Nassiba Benabdelhafid	sahbia bessid
Nathalie BOSTEL	SALMA MAKBOUL
Nejib Moalla	Samia Gamoura
Nhan Quy Nguyen	Sanaa
Nicolas Murcia	Sanaa TISS
Nidhal Rezg	Sara MALLAH
Nikolena Christofi	Sébastien Nantel
Olivier Cardin	Sekoun-Abderahmane KEBE
Olivier Péton	SIADAT Ali
OMAR EL BEQQALI	Simon Thevenin
ons saidi	SIRGABSOU Yandika
Otman Abdussalam	Slim ZIDI
Ouhimmou, Mustapha	Sofiene Dellagi
Oussama Ben-Ammar	Sondes CHaabane
parrenin bernard	Stephane HUBAC
Parrenin Marie Marielle	Sylvie Norre
PATRICE LANDAGARAY	TALEB Ismail
PETRONIJEVIC Jelena	Tarik ZOUADI
pierre baptiste	tawba dridi
Pierre CASTAGNA	Thibaud Monteiro
Pierre Lopez	Thierry Coudert
Piers Barrios	Thomas Antonio Hernandez Gutierrez
Polo-Mejia, Oliver DI IZ RO - AF	Thomas Hacardiaux
Quentin Lejeune	Timothée CHANE-HAÏ
Quoc Nhat Han TRAN	Tu Yongqiang
Rabia	Vincent Clivillé
Rachel CAMPOS SABIONI	Vincent Hovelaque
Rachida ABBOU	WU Xuan
rania	youness87 el
Rania EL Kammouni	Youssef Abidar
Remiel FENO	Youssef Lahrichi
remy houssin	Zed Haj
RGUIGA GHITA	Zied Hajej
Riad CHEMALI	Zineb MOUHIB