



**HAL**  
open science

# **Un environnement d'aide à la décision pour l'accompagnement des entreprises (PME) à la transformation dans un contexte d'industrie 4.0**

Frédéric Grimaud

## **► To cite this version:**

Frédéric Grimaud. Un environnement d'aide à la décision pour l'accompagnement des entreprises (PME) à la transformation dans un contexte d'industrie 4.0. Modélisation et simulation. Mines Saint-Etienne, 2020. <tel-04845381>

**HAL Id: tel-04845381**

**<https://hal.science/tel-04845381v1>**

Submitted on 18 Dec 2024

**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.



Distributed under a Creative Commons CC BY-ND 4.0 - Attribution - No Derivative Works - International License

MINES SAINT-ÉTIENNE  
UMR CNRS 6158, LIMOS

---

Projet

D'HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

« Un environnement d'aide à la décision pour  
l'accompagnement des entreprises (PME) à la transformation  
dans un contexte d'industrie 4.0 »

Présenté par

Frédéric GRIMAUD

Soutenance prévue **le 17 Décembre 2020**, devant le jury composé de

Pierre CASTAGNA	Professeur, Université de Nantes, Rapporteur,
Samir LAMOURI	Professeur, Arts et Métiers Paris, Rapporteur,
Farouk YALAOUI	Professeur, UTT de Troyes, Rapporteur,
Xavier DELORME	Professeur, Mines Saint-Étienne, Examineur,
Michel GOURGAND	Professeur, Université Clermont Auvergne, Examineur,
Hendrik VAN LANDEGHEM	Professeur, Université de Gand, Examineur,
Caroline THIERRY	Professeure, Université de Toulouse Jean-Jaurès, Examinatrice,
Alexandre DOLGUI	Professeur, IMT Atlantique, Directeur de recherche,

et la participation de

Pascal LAURIN	Directeur Industrie 4.0 BOSCH France et Benelux, invité
---------------	---

---



## REMERCIEMENTS

Ce mémoire n'aurait sans doute pas vu le jour sans la ténacité de certaines personnes que je souhaite aujourd'hui remercier chaleureusement.

La première personne est Alexandre DOLGUI qui m'a permis de participer à de nombreux projets de recherche et m'a initié aux activités managériales. Il m'a également soutenu (le mot est faible) dans cette aventure qu'est la rédaction de cette H.D.R.

Je tiens également à remercier Xavier DELORME et Mireille BATTON-HUBERT pour leurs soutiens sans faille ces dernières années et leurs avis toujours pertinents. La vie dans un laboratoire de recherche étant un échange permanent, j'y associe également tous mes collègues et tous les thésards avec lesquels j'ai travaillé.

Enfin, cette liste ne serait pas complète si je n'y associais pas ma femme Magali et notre fils Maxime. Je ne trouve pas les mots pour les remercier, car ils ont souvent cru en moi ... plus que moi ! J'espère pouvoir leur rendre cette confiance et cette énergie dans leurs futurs projets.



## SOMMAIRE

REMERCIEMENTS .....	2
SOMMAIRE .....	4
<b>CURRICULUM VITAE .....</b>	<b>8</b>
<b>ÉTAT-CIVIL, FORMATIONS &amp; EXPERIENCES PROFESSIONNELLES .....</b>	<b>10</b>
<b>CONCEPTIONS ET ANIMATIONS PÉDAGOGIQUES .....</b>	<b>11</b>
Formations autour de « INFORMATIQUE » .....	12
Formations autour de « SIMULATION DE FLUX » .....	13
Formations autour de l' « EXCELLENCE OPERATIONNELLE » .....	13
Formations autour de « ORGANISATION INDUSTRIELLE » .....	15
Co-Conception du Mastère spécialisé MS-MTI .....	15
MISSIONS TRANSVERSES : .....	16
<b>ACTIVITÉS DE RECHERCHE &amp; DEVELOPPEMENT .....</b>	<b>17</b>
MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'INTÉROPERABILITE DES SYSTÈMES INDUSTRIELS.....	18
VARIABILITÉ/INFLEXIBILITÉ DANS LES MODÈLES DE PILOTAGE INDUSTRIEL .....	21
INGÉNIERIE DE PLATEFORMES .....	27
INEXO : une première plateforme Lean basée sur le modèle allemand.....	28
PerformanceLab : Une deuxième plateforme à vocation plus systémique .....	30
IT'mFactory, une plateforme dédiée Industrie du Futur.....	32
<b>RESPONSABILITÉS MANAGÉRIALES.....</b>	<b>33</b>
Chargé de mission « Relation Mines Saint-Etienne - ISTP .....	34
Directeur-adjoint du centre G2I .....	35
Directeur-adjoint du laboratoire LSTI .....	36
Directeur-Délégué au Monde Économique de l'Institut FAYOL.....	37
Responsable de plateforme R&D .....	40
Co-encadrant de thèses .....	41



<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>46</b>
<b>CHAPITRE 1 : UNE APPROCHE SIMULATOIRE COMME COLONNE VERTEBRALE.....</b>	<b>50</b>
<b>1. UNE APPROCHE MODULAIRE ET DISTRIBUEE .....</b>	<b>54</b>
1. Autour des travaux de thèse de Stéphane GALLAND .....	54
2. Autour de la thèse de Vincent AUGUSTO.....	58
3. Autour des travaux de thèse de Mahdi EL ALAOUI .....	59
<b>2. UNE APPROCHE PRO-ACTIVE, LA SIMULATION « IN VITRO ».....</b>	<b>66</b>
1. Autour des travaux de thèse de Mohand ESSAID.....	66
2. Autour des travaux de thèse d'Afafe ZHEROUNI.....	68
<b>CHAPITRE 2 : VARIABILITÉ/INFLEXIBILITÉ DANS LES MODES DE PILOTAGE INDUSTRIEL .....</b>	<b>74</b>
<b>1. VARIABILITÉ, LA FAIRE DISPARAÎTRE OU APPRENDRE À LA GÉRER ? .....</b>	<b>76</b>
1. Autour des travaux de thèse de Mehdi LAMIRI .....	76
2. Autour des travaux de thèse de Ksenia SHEMELEVA.....	79
<b>2. ÉTUDE DE « NOUVEAUX » MODES DE PILOTAGE.....</b>	<b>83</b>
1. Autour des travaux de thèse de Mustapha CHEURFA .....	83
2. Autour des travaux de thèse de Sonia ROUIBI.....	86
3. Autour des travaux de thèse de Stéphanie BAYARD .....	88
<b>CHAPITRE 3 : PROJET DE RECHERCHE AUTOUR DE IT'mFACTORY .....</b>	<b>92</b>
<b>1. IT'mFactory : UNE PLATEFORME R&amp;D DEDIEE À L'INDUSTRIE DU FUTUR .....</b>	<b>94</b>
1. Finalités de la plateforme de R&D IT'mFactory .....	94
2. Description de la plateforme et de l'offre.....	95
<b>2. ACTIVITÉS DE RECHERCHE &amp; DÉVELOPPEMENT AUTOUR DE IT'mFactory .....</b>	<b>103</b>
1. Preuve de concept avec la start-up OPTI'WAVES.....	103
2. POC avec une entreprise de construction de machines spéciales.....	104
<b>3. PERSPECTIVES DE RECHERCHE &amp; DEVELOPPEMENT AUTOUR DE IT'mFACTORY .....</b>	<b>105</b>
1. Investigation de nouvelles méthodes de pilotage .....	105
2. Participation à la construction d'une chaire industrielle sur « Digital Twin ».....	106
3. Développement des nouvelles offres de formation/action.....	108
4. Participation au développement d'une nouvelle plateforme R&D à LYON .....	111
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>114</b>

<b>LISTE DES PUBLICATIONS</b> .....	<b>118</b>
1. ARTICLE DANS DES REVUES.....	118
2. CHAPITRE D'OUVRAGE, NUMEROS SPECIAUX & SESSIONS INVITE .....	119
3. COMMUNICATION DANS DES CONGRES .....	119
4. COMMUNICATION DANS DES WORKSHOP .....	123
<b>SELECTION DE 5 PUBLICATIONS</b> .....	<b>124</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>126</b>
<b>ANNEXE 1 : SELECTION DE 5 PUBLICATIONS</b> .....	<b>132</b>





## CURRICULUM VITAE





## ÉTAT-CIVIL, FORMATIONS & EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

---

51 ans, Marié, 1 enfant (Maxime, né en 2004)

Dégagé des Obligations Militaires (01 Février 92 - 01 Décembre 92)

### Adresse Privée

---

117 Chemin des écureuils  
42340 Rivas

☎ 06 27 74 00 15

### Adresse Professionnelle

---

Mines Saint-Étienne / Institut FAYOL  
Département GMI (Génie Mathématique et Industriel)  
158 Cours FAURIEL  
42 023 Saint-Étienne Cedex 2

☎ 04 77 42 01 77

Mel frederic.grimaud@mines-stetienne.fr

## DOCTEUR & INGÉNIEUR en INFORMATIQUE

**Septembre 90 - Juin 91** Diplôme d'Ingénieur en Informatique au C.U.S.T. (Centre Universitaire des Sciences et Techniques) à Clermont-Ferrand.

et Diplôme de D.E.A. d'Informatique - Option Modélisation des systèmes de production au Laboratoire d'Informatique de Clermont-Ferrand.

**Janvier 93 - Octobre 96** Diplôme de Docteur d'Université ès Sciences - Spécialité Informatique, à l'École Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur de Clermont-Ferrand.

## EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

**Décembre 92 - Août 95** Allocataire de Recherche au Laboratoire d'Informatique de Clermont-Ferrand.

**Septembre 95 - Août 96** A.T.E.R. (Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche) à l'Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II en 27<sup>ème</sup> section.

**Janvier 97 - décembre 98** Ingénieur de Recherche (en CDD) à l'École des Mines de Saint-Étienne.

*En janvier 1997, j'ai été engagé à l'École des Mines de Saint-Étienne sur un poste d'Ingénieur de Recherche au centre SIMADE (Système Informatique, Mathématiques, Aide à la décision, et Environnement) dans le département SIC (Systèmes Industriels Coopératifs) au sein de l'équipe EMSI (Etude et Modélisation des Systèmes Industriels) pour un CDD de trois ans.*



**Janvier 99 -**

*Maître-Assistant en Génie Industriel (Fonctionnaire)*

En janvier 1999, j'ai été engagé à l'École des Mines de Saint-Étienne sur un poste de Maître-Assistant en Génie Productique au centre SIMMO ex SIMADE (Système Informatique, Mathématiques, Aide à la décision, et Environnement) dans le département SIC (Systèmes Industriels Coopératifs) au sein de l'équipe EMSI (Etude et Modélisation des Systèmes Industriels), devenu ensuite le département MSGI (Méthodes Scientifiques pour la Gestion Industrielle) du centre G2I (Génie Industriel et Informatique).

- À partir de 2007, j'ai été directeur-adjoint de ce centre G2I et ai participé aux activités de l'équipe ROGI du laboratoire LSTI, laboratoire dont j'ai également été le directeur-adjoint.
- De 2011 à 2016, j'ai été directeur délégué au monde économique de l'Institut FAYOL de l'École des Mines de Saint-Étienne. L'Institut FAYOL, du nom de l'un des pères du management moderne, ancien élève de l'École (1841-1925), s'intéresse à la performance des entreprises dans une approche systémique large, et vise à concevoir les organisations du futur.
- Depuis 2016, j'ai été nommé chargé de mission pour construire une plateforme dédiée à l'Industrie 4.0, et depuis 2018, responsable de la plateforme IT'mFactory (<https://www.itm-factory.fr>)

Je suis également membre depuis le 01/01/2012 du laboratoire de recherche LIMOS UMR CNRS 6158.

À travers les 3 grandes sections suivantes de ce Curriculum Vitae, je vous propose de revisiter mes activités pédagogiques, mes activités de Recherche et Développement (en y incluant les actions de transferts industriels), et pour terminer une réflexion sur mes principales activités managériales.

## **CONCEPTIONS ET ANIMATIONS PÉDAGOGIQUES**

---

Cette partie reprend mes principales activités d'enseignement sans pour autant être exhaustive. J'ai participé à de nombreuses autres activités, mais j'ai fait le choix de ne reprendre que celles qui avaient un lien direct avec l'évaluation et l'amélioration des performances des systèmes industriels.

Pendant ces vingt dernières années, j'ai donc pu enseigner dans des environnements assez diversifiés pour des publics variés, autour des thèmes suivants : Recherche Opérationnelle, Modélisation et Simulation des flux, Génie Industriel, Business Intelligence, Excellence Opérationnelle.

Ces enseignements représentent en moyenne un volume annuel de 650 H DF (équivalent à 350 H eq.TD du système universitaire). Pour information la charge moyenne à Mines Saint-Étienne est d'environ 250 H DF, et la charge moyenne au sein de l'Institut Henri FAYOL plus précisément est de 350 H DF).

Année	NbheuresDF
2019	591
2018	603
2017	573
2016	530
2015	762
2014	604
2013	609
2012	731
2011	944
2010	590
2009	525
2008	540
2007	722

Tableau 1 : Nombre d'heures d'enseignement DF depuis la création du relevé personnel d'activité

L'ensemble des actions décrites dans les paragraphes suivants n'a de sens que dans une démarche fédératrice et managériale pour emmener avec moi mes collègues enseignants-chercheurs à la création de modules de formation. Ce travail collaboratif est essentiel pour en assurer la pérennité. L'ensemble des démarches de conception et de pilotage de ces projets fut pour moi l'occasion d'identifier les ressources, les énergies à cristalliser pour construire les groupes de travail.

### Formations autour de « INFORMATIQUE »

Pour pouvoir, entre autres, construire des modules de formation orientés « simulation », il fallait mettre en place un ensemble de formations de base à l'informatique. J'ai donc construit et participé à la mise en œuvre des modules suivants :

- Conception, Responsabilité et Réalisation de cours **d'Outils bureautiques avancés** (20 h/an pour une promo de 130 élèves/an de 1997 à 2002)
- Réalisation de cours de **Programmation Informatique** (40 h/an pour une promo de 130 élèves/an de 1997 à 2002)
- Conception, Responsabilité et Réalisation de cours **Business Intelligence** (40 h pour environ 30 élèves/an de 2014 à 2015)

Mon implication dans ces cours m'a permis de prendre à terme la responsabilité des Groupes Pédagogiques les incluant, en particulier :

- Re-Conception & Responsabilité du **Pôle 1A « Informatique »** (À niveau L3) 120 h/an (École des Mines de Saint-Étienne) de 2000 à 2003

- Conception et Responsabilité de la **Toolbox 1A/2A « Applications Intégrées »** 40 h/an (École des Mines de Saint-Étienne) à partir de 2015

### Formations autour de « SIMULATION DE FLUX »

- À l'ISTP (Institut de formation sous statut salarié de l'École des Mines de Saint-Étienne), j'avais la responsabilité d'un cours (conçu et réalisé) intitulé « **Simulation de flux** » (30 h/an pour environ 60 élèves/an de 1997 à 2015)
- À l'Université de Saint-Étienne, j'avais la responsabilité d'un cours (conçu et réalisé) intitulé « **Simulation de flux** » en DSTN GPAO (30h/an pour environ 20 étudiants/an de 2002 à 2004)
- À Mines Saint-Étienne, dans le cadre des formations des élèves inscrits dans le cycle « Ingénieur Civil des Mines (ICM), j'avais la responsabilité d'un cours (conçu et réalisé) intitulé « **Modélisation & Simulation de flux** » (40 h pour environ 30 élèves/an de 1997 à 2015)
- À l'Université de Savoie (Chambéry), j'avais la responsabilité, d'un cours (conçu et réalisé) intitulé « **Simulation Multi-Agent** » au sein du DEA Informatique (environ 20 h/an pour environ 20 étudiants/an de 2002 à 2004)
- Dans le cadre des formations proposées aux doctorants par l'École Doctoral EDSIS, j'avais la responsabilité d'un cours (conçu et réalisé) intitulé « **Evaluation des Performances par Simulation** » (environ 20 h/an pour environ 20 doctorants de 2000 à 2006)
- Dans le cadre du master « Industrial Engineering » de l'Ecole Centrale de Nantes, je réalise un cours (niveau M1) intitulé « **Stochastic and Multi-Agent simulation** » (32h/an pour environ 20 étudiants/an depuis 2018) que j'ai co-conçu avec Pr. Pierre Castagna.

### Formations autour de l' « EXCELLENCE OPERATIONNELLE »

- À Mines Saint-Étienne, j'ai eu la responsabilité d'un cours conçu et réalisé « **Excellence Opérationnelle** » (80 h pour environ 30 élèves/an de 2011 à 2015)
- À l'ISTP (Institut de formation sous statut salarié de l'École des Mines de Saint-Étienne), j'ai eu la responsabilité d'un cours (conçu et réalisé) « **Excellence Opérationnelle** » (20 h pour environ 130 élèves de 2015 à 2019)
- Encadrement de **Projets Industriels**
- À INEXO (Institut de l'Excellence Opérationnelle à Lyon), j'ai réalisé des **sessions de formation à l'Excellence Opérationnelle** (environ 60 h/an pour environ 20 cadres de l'industrie/an de 2008 à 2012)

À la suite, ou pendant la conception de ces modules, j'ai pris la responsabilité des groupes pédagogiques les incluant, à savoir :

- Co-Conception et coresponsabilité de l'**axe 2A « Excellence Opérationnelle »** 130 h/an (École des Mines de Saint-Étienne) de 2011 à 2014

La création de la plateforme INEXO (décrite dans la partie Ingénierie de Plateforme de ce C.V.) fut pour moi l'occasion de créer à Mines Saint-Étienne, en collaboration avec Hélène MARIAN, une formation Excellence Opérationnelle à destination de nos étudiants, avec la structuration suivante :

- UP1 (12h) : Introduction, « basiques » du Lean Management
- UP2 (39h) : Outils du Lean Management
- UP3 (33h) : Projets en entreprise
- UP4 (12h) : Prise de recul, vision critique du Lean Management
- UP5 (33h) : Le Management Lean

Cette formation a été donnée pendant 4 années à environ 30 étudiants/an, avant la refonte de notre maquette pédagogique et la création dans ce cadre du Défi Sociétal LMRI (levier et management de la transition industrielle).

- Conception et Responsabilité du **Défi sociétal 2A/3A LMRI (Leviers et Management pour le Renouveau Industriel)** 160 h/an (École des Mines de Saint-Étienne) à partir de 2015  
Ce défi, structuré sur 2 semestres de formation, s'articule autour de la proposition suivante :

#### Semestre 1

UP1 : Connaissance de l'entreprise 12 h (Jeu d'entreprise BUSINESS CLASS)

UP2 : Excellence Opérationnelle 60 h (Utilisation des plateformes R&D)

- Introduction & Basiques de l'Excellence Opérationnelle
- Les outils de l'Excellence opérationnelle
- Les outils « de flux »
- Les outils « managériaux » :

UP3 : Conférences/débat/Témoignages 9 h

#### Semestre 2

UP1 : L'entreprise et son territoire 21 h (Diagnostic stratégique « performance globale » d'une entreprise)

UP2 : Les nouveaux leviers de la performance 48 h (Utilisation des plateformes R&D)

- Leviers SOCIÉTAUX (Nouveaux modes de consommation, Management participatif, Diversité)
- Leviers TECHNOLOGIQUES (Processus d'innovation, Impression 3D, Objets communicants, ...)
- Leviers ORGANISATIONNELS (Système d'information (CIM), Mass customization, Servicisation (Produits/Process/service), Conception modulaire)

UP3 : Conférences/débats 9 h

### Formations autour de « ORGANISATION INDUSTRIELLE »

À Mines Saint-Étienne, dans le cadre du master recherche Génie Industriel (Niveau M2), j'ai pu reconcevoir et coréaliser un cours de **Gestion de Production** « UE 1 Supply Chain & Operation Management » (environ 20 élèves/an de 2015 à maintenant) dont j'ai maintenant la responsabilité.

L'objectif de ce cours est de donner un aperçu des techniques de Supply Chain Management, un domaine industriel en pleine expansion, de montrer les différentes approches (classiques et innovantes) utilisées en gestion de production, ainsi que leurs conditions d'application et enfin de montrer l'importance d'une démarche d'amélioration continue au sein d'une entreprise et de l'utilisation des "digital twins" pour l'anticipation des décisions.

Un retour d'expérience d'industriels variés permet d'aborder la mise en œuvre de ces concepts et modèles sur des cas concrets et d'identifier les verrous scientifiques sous-jacents.

Les principaux thèmes abordés sont :

- Généralités sur la SC : définitions, problématiques, constituants, modélisation, indicateurs
- Stratégies de distribution et design, alliances, différenciation retardée, transshipment, warehousing
- Les Outils IT de la SC (ERP, MES, CRM, WMS, ...)
- Gestion des données, prévisions, et Modèles de GP : MRP, DRP, Kanban, DD MRP, EOQ, Lot sizing, Stock de sécurité, CPFR, effet Bullwip, CMI, risk pooling...
- Lean Manufacturing
- Evaluation des performances par simulation
- Intégration production/logistique
- Etudes de cas et retours d'expériences d'industriels (Donneur d'ordre, éditeur de logiciel, logisticien)

### Co-Conception du Mastère spécialisé MS-MTI

J'ai participé à la création d'un nouveau Mastère Spécialisé, nommé MTI (Management de la Transition Industrielle) qui base sa pédagogie en grande partie sur la plateforme IT'mFactory, développée dans le chapitre 3 de la partie principale de ce mémoire.

La transition industrielle vise à répondre à de multiples enjeux d'où sa multi-dimensionnalité et le besoin d'une approche globale pour l'appréhender. Ainsi la transition industrielle peut être considérée comme l'articulation des points suivants :

- Répondre aux nouvelles contraintes économiques et opportunités à venir en termes de mondialisation et initiatives de relocalisation, évolution des marchés, évolution des comportements des clients, etc. ;
- Faciliter le déploiement de nouveaux « business models » et s'adapter aux évolutions sociétales à travers une offre technologique variée ;

- Anticiper les contraintes structurelles comme par exemple le modèle organisationnel, le rôle de l'écosystème, les contraintes culturelles et sociétales ;
- Prendre en compte la dimension environnementale et énergétique de l'impact de l'activité de l'entreprise.

Dans ce cadre, la formation vise à former culturellement des jeunes ingénieurs, cadres d'entreprise, etc... avec des outils et méthodes pour la conduite de la mutation industrielle, pour être capables de :

- Analyser les problématiques industrielles et managériales de l'entreprise face à la transition industrielle pour adapter son orientation stratégique ;
- Concevoir des systèmes/solutions traduisant l'orientation stratégique de l'entreprise vers la transition industrielle et s'appuyant sur les nouveaux modes de production, les méthodes et outils émergents intégrant le numérique, par exemple dans les systèmes hospitaliers [BLUA et al. 2019] ;
- Organiser et piloter la mise en œuvre et assurer le suivi des solutions s'appuyant sur les nouveaux modes de production, les méthodes et outils émergents intégrant le numérique ;
- Assurer la continuité de l'excellence opérationnelle pour pérenniser le processus de transition.

L'organisation du mastère MS-MTI est conçu autour de 6 groupes pédagogiques :

- GP1 – Entreprise et son écosystème, 8 ECTS, 57 heures,
- GP2 – Conception des systèmes : nouveaux modes de production, 8 ECTS, 60 heures
- GP3 – Organisation et management des systèmes, 9 ECTS, 72 heures,
- GP4 – Excellence opérationnelle, 7 ECTS, 54 heures
- GP5 – Technologies et systèmes d'information, 8 ECTS, 69 heures,
- GP6 – Environnement et RSE, 5 ECTS, 39 heures, Responsable :

À ce jour, le mastère MS-MSTI en est à sa troisième promotion, avec une petite dizaine d'élèves par an.

### MISSIONS TRANSVERSES :

En plus de ces activités pédagogiques directement liées au face à face avec les élèves, j'ai également eu les responsabilités ou missions transverses suivantes :

**Correspondant TICE** de l'École des Mines de Saint-Étienne pour la GEV (Grande École Virtuelle) du GEM de 2000 à 2004

**Chargé de mission à la Direction des Formations** « Relations ISTP/École des Mines de Saint-Étienne » (gestion administrative et pédagogique de 600 h/an environ) de 2002 et 2006

**Membre permanent du Comité des Études** (École des Mines de Saint-Étienne) de 2007 à maintenant

**Membre du Comité pédagogique** « Formation Sous statut salarié » à partir de 2015

Pendant ces vingt dernières années, j'ai donc été amené à piloter la conception et la réalisation de modules de formations (que ce soit en Informatique, en Gestion industrielle, en Recherche Opérationnelle).

Ces actions se passent généralement en transversal, et je peux dire aujourd'hui que j'ai pris autant de plaisir à concevoir, mettre en place ces formations (autour de groupes « projet » d'environ 5 personnes) qu'à les piloter, et en transférer certaines (bénéfice de l'âge) aux nouveaux enseignants-chercheurs frais et dispos, et surtout prêts à amener du sang neuf en les restructurant et en leur redonnant une nouvelle dynamique.

L'ensemble de ces activités d'enseignement n'ont de sens que parce qu'elles sont également supportées par un ensemble d'activités de recherche et développement. Ce sont ces activités que je détaille dans la section suivante.

## ACTIVITÉS DE RECHERCHE & DEVELOPPEMENT

---

Les activités de recherche que j'ai menées ces 20 dernières années à l'École des Mines de Saint-Étienne concernent l'évaluation et l'amélioration des performances des systèmes industriels, en traitant les trois principaux inhibiteurs de la performance que sont la variabilité, l'inflexibilité et les gaspillages, et en fournissant des outils de modélisation et de simulation pour en évaluer et améliorer les performances.

Ces activités de recherche m'ont amené à co-encadrer directement **9 doctorants (7 thèses soutenues et 2 en cours)**, à participer à 3 autres thèses également soutenues et à participer à de nombreux projets de recherche autour des deux thématiques suivantes :

- Modélisation et simulation de l'Interopérabilité des systèmes industriels
- Variabilité / Inflexibilité dans les modèles de pilotage industriel

J'ai publié une **quarantaine d'articles dans les actes de conférences à comité de lecture et 9 articles dans des revues internationales.**

	REVUES	CONFERENCES avec COMITE DE LECTURE	CHAPITRES DE LIVRES NUMÉROS SPÉCIAUX & SESSIONS INVITÉES
2020	1 ( en soumission)	2	
2019		1	
2018		1	
2015		3	1
2014	1	3	
2013	1	2	

2012	1	3	
2011	1	1	1
2010		3	1
2009	1	2	
2008	2	2	
2007		3	
2006	1	3	
2005			1
2004		3	
2003	1		
2001		6	
2000		2	
1999		1	
<b>TOTAL</b>	<b>9</b>	<b>41</b>	<b>4</b>

Tableau 2 : Synthèse des principales publications par année

Mes activités de transferts industriels ont été liées aux études réalisées pour le compte d'industriels en lien direct avec les thématiques de recherche et d'enseignement citées ci-dessus.

Ces activités de transferts ont pour objectifs de faire du lien entre les entreprises et les activités de formation et de recherche de l'École des Mines de Saint-Étienne afin de faire naître des relations à long terme pour nourrir des partenariats et des échanges gagnants-gagnants (stages, conférences, participations à des projets de recherche). Elles permettent également de rester en phase avec le besoin industriel, et alimentent en exemples les formations auxquelles je participe.

Je vous propose de relire ces activités de Recherche & Développement selon les deux thématiques citées précédemment, en faisant des focus sur certains projets ou activités qui me paraissent être les plus représentatifs.

## MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'INTÉROPERABILITE DES SYSTÈMES INDUSTRIELS

### 1998 – 2001 Co-encadrement (33%) de la thèse de Stéphane GALLAND

« Approche multi-agents pour la conception et la construction d'un environnement de simulation en vue de l'évaluation des performances des ateliers multi-sites »

Spécialité : Informatique, Soutenue le 20 Décembre 2001

Jean-Pierre CAMPAGNE, Professeur, Mines Saint-Étienne (Directeur de thèse), Frédéric GRIMAUD, Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant), Philippe BEAUNE, Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant).

**2001                    Projet COPAL, Modélisation et simulation d'un atelier de pions en aluminium**

Le projet COPAL (l'industrie de l'emballage aluminium) avait pour objectif la modélisation des flux des ateliers et la simulation de différents plans d'expériences. La direction visait à augmenter la capacité de production de l'usine et résoudre les problèmes de flux rencontrés.

**2002                    Projet GANZONI, modélisation et simulation d'un atelier de traitement thermique**

Le projet GANZONI avait pour objet de modéliser l'atelier de traitement thermique (regroupant les opérations de pré-fixage et de formage de bas et chaussettes) de la société GANZONI à Andrézieux-Bouthéon au moyen d'un outil de simulation, afin d'opérer un grand nombre de tests, et ce dans des situations variées.

**2002 – 2003        Projet SOLVAY, Modélisation et simulation d'un transstockeur**

Le projet SOLVAY (industrie pharmaceutique) était en relation directe avec un équipement de l'usine (le magasin de grande hauteur automatisé, appelé transstockeur TK) et consistait à réaliser un modèle de simulation du TK afin de pouvoir vérifier dans un premier temps son comportement (par exemple en cas d'engorgement lors du régime permanent ou en cas de redémarrage suite à des arrêts programmés ou non) et de pouvoir proposer des solutions alternatives. Dans un second temps, nous avons travaillé sur l'optimisation des règles de priorité du TK.

**2005                    Projet DANONE, Modélisation et Simulation de l'usine de Saint-Just-Chaleyssin**

Le projet DANONE (projet « TGV Danette » de Saint-Just-Chaleyssin) : visant l'augmentation de sa capacité de production, la direction de l'usine nous a demandé de concevoir un modèle de simulation de l'ensemble de l'usine, afin de confirmer les choix réalisés dans le cadre de ce projet, et de prévoir l'intégration des nouveaux process de production au schéma actuel, intégration difficile à appréhender compte tenu de la complexité du mix produit et du démarrage progressif de cette nouvelle ligne.

Ce projet fut le premier où des notions de lean manufacturing [OHNO 1989] (utilisés en interne pour la construction des nouvelles lignes à tester) ont été intégrées dans notre réflexion [SCHROER 2004], et où nous avons pu tester la robustesse de notre approche de modélisation.

**2005 – 2008        Co-Encadrement ( 50%) de la thèse de Mohand ESSAID**

« Modélisation et simulation de la connectivité des flux logistiques dans les réseaux manufacturiers »

*Spécialité : Génie Industriel, Soutenue le 17 Novembre 2008*

*Patrick BURLAT, Professeur, Mines Saint-Étienne (Directeur de thèse), Frédéric GRIMAUD, Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant).*

**2007                   Projet ADI TECHNOLOGIE, Modélisation des ateliers de production de forêts BELIN**

Le but du projet BELIN qui m'a été confié par le cabinet de consulting ADI Technologie, était de mesurer l'impact, en terme de quantité produite et de taux d'occupation machines et opérateurs, des futurs projets « SMED », « amélioration de la polyvalence des opérateurs », « reconfiguration du parc machine », et « redéfinition de la démarche qualité » de leur client BELIN.

**2008 – 2012       Co-Encadrement (50%) de la thèse de Sonia ROUBI**

« Impacts du partage d'informations et du Vendor Managed Inventory sur la performance des chaînes logistiques »

*Spécialité: Génie Industriel, soutenue le 15 mai 2012*

*Patrick BURLAT, Professeur, Mines Saint Étienne (Directeur de thèse), Frédéric GRIMAUD, Maître-Assistant, Mines Saint Étienne (Co-encadrant de thèse).*

**2011 – 2014       Participation au projet de recherche européen amePLM**

Le projet de recherche européen amePLM (advanced Platform for manufacturing engineering and Product Lifecycle Management), piloté par J. LENTES (Fraunhofer IPA of Stuttgart), est un projet d'environ 3 000 000 euros regroupant les partenaires suivants : Fraunhofer IPA of Stuttgart (Germany), Politecnico di Torino (Italy), École des Mines de Saint-Étienne, University of Limerick (Ireland), University of Nottingham (United Kingdom), University of Trieste (Italy), Ontoprise GmbH (Germany), Intel (Ireland), RTT Romania Telecommunication Trading Srl. (Romania), Aerogen Ltd (Ireland), MBtech Group (Germany), Shannon Coiled Springs Ltd (Ireland)

L'objectif de ce projet était de concevoir une ontologie autour de l'interopérabilité et l'intégration des systèmes industriels afin de créer une plateforme « amePLM » basée sur cette ontologie. Elle met à la disposition des participants un ensemble d'outils de recherche & développement pour les aider à l'analyse, la conception, l'optimisation (basée sur des heuristiques et la simulation) et les tests des systèmes à concevoir. Une base de cas fournie par les industriels a servi à nourrir cette plateforme.

**2013 – 2016       Participation au projet de recherche ANR SCRIPT**

Le projet ANR SCRIPT « Système d'aide à la décision pour une Conception Robuste et Indicateurs de la qualité de service des Plans de Transport ferroviaires » est un projet d'environ 550000 euros, piloté par Xavier DELORME (École des Mines de Saint-Étienne) en partenariat avec la SNCF.

L'objectif de ce projet était de travailler sur la robustesse des plans de transport autour de 3 axes : la définition des indicateurs de performance pour bien définir et observer cette robustesse, la conception d'un outil d'optimisation des plans de transport (intégrant de facto cette dernière et étant compatible avec les outils déjà définis par la SNCF), ainsi que la conception d'un outil de simulation permettant de tester la robustesse des plans de transports obtenus par l'outil d'optimisation suivant les indicateurs de performance retenus.

**2013 – 2016 Co-Encadrement (25%) de la thèse d' Afaf ZEHROUNI**

« Etude et optimisation de la robustesse pour la planification intégrée du transport ferroviaire »

*Spécialité : Génie Industriel, soutenue le 12 mai 2016*

*Dominique FEILLET, Professeur, Mines Saint-Étienne (Directeur de thèse), Xavier DELORME, Maître-Assistant HDR, Mines Saint-Étienne (Co-Directeur de thèse), Frédéric GRIMAUD, Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant), Olivier GUYON, Docteur, SNCF, (Co-encadrant).*

**2018 - Participation au projet ELM LEBLANC**

Dans le cadre de la convention de partenariat entre l'Institut Mines Telecom (IMT) et l'entreprise ELM Leblanc, nous travaillons à la conception d'un environnement de modélisation/simulation pour accélérer la transition de l'outil productif ELM Leblanc vers une organisation Industrie 4.0 (agilité, systèmes reconfigurables).

La thèse de Mahdi EL ALLAOUI rentre dans ce programme grâce à un financement CIFRE de l'ANRT, et participe à la validation de ces concepts sur un cas industriel à grande échelle.

**2018 - Co-encadrement (33%) de la thèse de Mahdi EL ALLAOUI**

« Design of manufacturing system within industry 4.0: A simulation approach »

*Xavier DELORME, Professeur, Mines Saint-Étienne (Directeur de thèse), Frédéric GRIMAUD, Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant), Paolo GIANESSI, Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant).*

L'ensemble des activités développées dans ce paragraphe sont nécessaires, mais ne sont pas suffisantes pour proposer un environnement d'aide à la décision pour le pilotage de systèmes de production. Une réflexion sur les modèles de pilotage doit être menée, pour proposer de manière homogène un contenant (la méthodologie et la construction de modèles de simulation) et le contenu (les modes de pilotage à tester).

**VARIABILITÉ/INFLEXIBILITÉ DANS LES MODÈLES DE PILOTAGE INDUSTRIEL**

**2002 – 2005 Co-Encadrement (33%) de la thèse de Mustapha CHEURFA**

« Gestion des ressources humaines en production cyclique »

*Spécialité : Génie Industriel, Soutenue le 28 février 2005*

*Jean Pierre CAMPAGNE, Professeur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (Directeur de thèse), Pierre BAPTISTE, professeur, École Polytechnique de Montréal (Co-directeur de thèse), Frédéric GRIMAUD, Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant).*

#### **2004 – 2007      Participation au projet européen CODESNET**

Le projet CODESNET « Collaborative demand and supply networks» (action de coordination européenne), porté par Agostino VILLA (Turin) était un projet d'environ 600 000 euros, regroupant 22 partenaires académiques et industriels européens dont IAO Fraunhofer de Stuttgart, Polytech Torino, Univ. Nottingham, Linköping Institute of Technology, École des Mines de Saint-Étienne, . . .

L'objectif de ce projet était de constituer et de faire vivre un portail collaboratif autour des activités « supply chain » permettant aux participants de trouver l'information et les bons interlocuteurs sur un sujet donné. Un travail important de bibliographie, de synthèse d'articles a été réalisé pour nourrir cette base de données/portail.

Ce fut pour moi l'occasion d'y apporter des éléments sur la simulation de flux, notamment les travaux réalisés sur les simulateurs « in vitro ».

#### **2004 – 2007      Co-Encadrement (50%) de la thèse de Mehdi LAMIRI – 2004/2007**

« Planification des blocs opératoires avec prise en compte des aléas »

*Spécialité : Génie Industriel, Soutenue le 4 octobre 2007*

*Xiaolan XIE, professeur, Mines Saint-Étienne (Directeur de thèse), Alexandre DOLGUI, Professeur, Mines Saint-Étienne (Co-directeur de thèse), Frédéric GRIMAUD, Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant).*

#### **2005 - 2009      Participation aux projets régionaux COPILOTES 1 & 2**

Les projets régionaux COPILOTES 1 & 2 pilotés par Lucien VINCENT et Patrick BURLAT regroupaient 7 laboratoires SPI / SHS : LIESP, G-SCOP, G2I, GAEL, COACTIS, LET et CERAG et 3 partenaires industriels : VALRHONA (agroalimentaire), BABOLAT (sport), ROSET (ameublement).

Les objectifs de recherche étaient les pratiques collaboratives et leur impact sur la performance (incluant la dimension sociétale/environnementale), les échanges d'informations et leur impact sur la performance.

La problématique était la mise en œuvre de mécanismes de coopération dans les chaînes logistiques, c'est-à-dire identifier et mesurer les impacts des pratiques de gestion et de la nature des informations partagées sur la performance des parties prenantes et de la chaîne de valeur globale.

#### **2006 – 2010      Participation aux projets régionaux (Cluster GOSPI) RMS**

Le projet régional RMS piloté par Alexandre DOLGUI regroupaient 3 laboratoires (G-SCOP, SYMME, École des Mines de Saint-Étienne). Il s'agissait d'un projet de recherche Régional (Cluster GOSPI) entre 2006 et 2010.

Ce projet avait comme objectif le développement d'un ensemble de méthodes d'aide à la décision permettant la réduction du cycle entre l'apparition d'une demande en produit et la livraison du produit chez le client, la diminution du coût de production et l'amélioration des conditions de travail dans le contexte des systèmes de production flexibles et reconfigurables.

**2007 – 2010 Co-Encadrement (50%) de la thèse de Ksenia SCHEMELEVA**

« Optimisation de la politique de lotissement et de séquençement pour une ligne de production soumise aux aléas »

*Spécialité : Génie Industriel, Soutenue le 13 décembre 2010*

*Alexandre DOLGUI, Professeur, Mines Saint-Étienne (Directeur de thèse), Frédéric GRIMAUD, Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant)*

**2010 – 2011 Participation au projet de recherche régional EUROLEAN – 2010/2011**

Le projet régional Rhône-Alpes « EUROLEAN, Vers un lean européen adapté », était piloté par Georges HABCHI (SYMME, Annecy), avec comme partenaires : CERSYL-ECAM, G-SCOP, IREGE, LIESP, SYMME, École des Mines de Saint-Étienne.

Ce projet avait pour objectif la définition d'une nouvelle approche d'évolution et de mise en œuvre de la philosophie Lean [DETTY et al. 2000] [LIAN et al. 2007] basée sur l'intégration des trois axes souvent étudiés de manière indépendante :

- L'axe théorique et scientifique qui manipule des équations et des informations souvent quantitatives et qui recherche à optimiser les caractéristiques techniques du système telles que le temps de cycle, le temps de production global, le takt time, etc.
- L'axe méthodologique et organisationnel qui vise à améliorer le système (surtout le système opérationnel) de manière continue, par petits pas, en réduisant / éliminant les gaspillages et les pertes (méthodes japonaises telles que le Kaizen, les 5S, le TPM, le kanban, la qualité, le SPC etc.)
- L'axe managérial et humain qui fait appel à une implication forte des ressources humaines et par conséquent fortement influencé par des critères de nature sociétale tels que les mentalités, les mœurs, les coutumes, etc.

Les aspects scientifiques sont assez bien abordés en occident et surtout en France et occupent une part non négligeable de la recherche dans le domaine. Les aspects méthodologiques et organisationnels sont plutôt enseignés et appliqués mais dans un contexte complètement différent de celui d'origine au Japon sans pour autant tenir compte de celui-ci. Les critères sociétaux sont quasiment négligés dans les aspects managériaux et humains.

Un rapport [DORISON 2009] sur l'enseignement de l'excellence opérationnelle dans les grandes écoles d'ingénieurs et de management reprend également cette problématique

La création des plateformes décrites dans ce mémoire va dans ce sens, en créant une synergie autour des aspects LEAN (formation, recherche, transfert)

### **2011 – 2012      Projet NEXTER, Accompagnement dans un projet de réorganisation industrielle**

Les marchés et le contexte ont amené la société NEXTER à répondre à des offres présentant une forte variabilité (de 20 à 500 véhicules) avec des contraintes fortes en termes de délai de fabrication. Dans ce cadre, Nexter souhaitait mettre en place une organisation industrielle lui permettant de répondre aux exigences de ses clients.

La société Nexter souhaitait s'appuyer sur une démarche d'aide à la décision au niveau des choix de l'organisation industrielle (Nombre de postes, Ligne ou Box, ...) et de la simulation et l'optimisation des flux. Les objectifs visés étaient la mise en place d'une démarche de choix industriel vis-à-vis des problématiques liées aux contraintes de flexibilité, de variabilité et de non valeurs ajoutées. La mise en place d'outils capables de valider différents concepts afin d'améliorer la démarche en termes de réactivité et de validation des différentes configurations de l'organisation industrielle était souhaitée.

Pour répondre à ce cahier des charges, a été proposée une réponse en deux phases :

- Phase 1 : Sensibilisation.  
Cette phase s'attachait à sensibiliser l'équipe projet (encadrants + fonctions supports) à différentes thématiques en lien avec les objectifs visés (base d'un système LEAN , Système opérationnel, Structure de management, États d'esprits et comportements, Observation de la valeur ajoutée, Flexibilité, Variabilité, Gaspillage).
- Phase 2 : L'accompagnement.  
Elle a consisté en un appui méthodologique de conduite de projet pour la transformation des activités, l'initiation d'un changement et une aide à la décision. Cet accompagnement a été centré sur la réflexion autour de l'optimisation des performances industrielles en s'appuyant sur les concepts et outils du LEAN MANAGEMENT ainsi que sur les principes de gestion et la simulation des flux. Le déploiement de certains outils a permis, parallèlement à la mise en pratique, de développer les compétences et l'ouverture des salariés à la démarche d'amélioration continue. Cette phase s'est déroulé sous forme de chantiers de type « formation action » par l'approche KAISEN (un problème, un groupe, un changement rapide, un résultat).

### **2012 – 2013      Projet THUASNE, Accompagnement à la conduite du changement**

La société THUASNE souhaitait former ses équipes opérationnelles au Lean Management, et nous a confié une mission de Formation-Action en deux phases :

- Phase 1 : Sensibilisation de l'encadrement  
Cette formation à l'Excellence Opérationnelle devait permettre de partager les préalables et fondamentaux qui permettraient aux dirigeants, au lean manager de l'entreprise et à ses

équipes de conduire une démarche de transformation Lean. Les thèmes abordés ont été : les grands principes du Lean, la standardisation, le pilotage de la performance, le processus d'amélioration continue, l'impact financier d'une transformation Lean, la cartographie des processus (Value Stream Mapping), l'introduction aux outils du Lean permettant d'optimiser la performance.

- Phase 2 : Formation et Accompagnement vers le déploiement du LEAN sur un atelier de production (atelier BANDES) et au sein du service Export, les 2 « ateliers pilotes ».
- L'accompagnement a été organisé sur la base d'une revue de projets par mois en moyenne. Cette fréquence a été jugée suffisante et nécessaire pour l'avancement des actions du projet et cohérente vis-à-vis de la capacité des ressources.

#### **2014 – 2015      Projet MTS, Mise en place d'un système de pilotage de la performance**

L'entreprise MTS, spécialisée dans la conception, fabrication d'arbres à cames, est une structure familiale implantée au Chambon-Feugerolles. Elle emploie aujourd'hui une cinquantaine de salariés. Dans un contexte concurrentiel fort, l'entreprise cherchait à améliorer sa compétitivité. Le levier de la performance de l'atelier de production restait perfectible et le dernier audit ISO 9001 avait mis en évidence des points d'amélioration dans la maîtrise des process, le traitement des problèmes et finalement la capacité de la structure à gérer durablement les problèmes.

La direction de MTS souhaitait donc s'appuyer sur une démarche d'amélioration continue pour pallier ces difficultés. La prestation s'est articulée autour de 2 axes complémentaires :

- Formation de l'encadrement :  
L'objectif de cette formation visait à initier l'encadrement de l'entreprise aux concepts de l'excellence opérationnelle. Au travers de l'utilisation d'un jeu d'entreprise, les participants ont pris la mesure de la complexité de l'organisation industrielle. Avec l'aide des formateurs, ils ont réalisé le diagnostic de l'entreprise, proposé et mis en œuvre les solutions permettant d'améliorer la performance de l'entreprise et améliorer la satisfaction client. Les différents éléments abordés lors de la formation ont été : introduction au Lean Manufacturing, notion de VA (valeur ajoutée), gaspillages, inflexibilités, variabilités, méthodologie de transformation (A3, PDCA), VSM (Cartographie des flux de valeur), concepts de gestion de production (flux tirés, poussés, JAT, lissage, planification, logistique alternative,...), outils de résolution de problèmes (8D, recherche de causes...), introduction aux outils opérationnels du Lean (Standards, 5S, SMED ...), structure de l'amélioration continue, pilotage de la performance
- Accompagnement sur les chantiers d'améliorations  
Après validation des actions à engager par la direction, la prestation a consisté en l'accompagnement à la conduite du changement au travers des chantiers d'amélioration retenus. Le principe de la formation action a été largement utilisé.  
Les responsables d'atelier ont été accompagnés individuellement afin de mettre en pratique les apports théoriques vus préalablement, en particulier les démarches de résolution de

problèmes. L'accompagnement a reposé sur la conduite de chantier (KAIZEN), mettant en œuvre différentes approches tels que PDCA, Ishikawa, 5 pourquoi, Arbre des causes, ... le tout représenté par le 8D.

L'accompagnement a été organisé sur la base d'une revue de projets par mois en moyenne.

#### **2016 – 2018      Projet CASINO, Accompagnement dans un projet d'Excellence Opérationnelle**

EASYDIS, filiale logistique du groupe Casino en France, est dédiée aux activités de préparations de commandes magasin et de livraisons pour les principales enseignes du groupe en France. La politique commerciale visant à baisser les prix de vente en magasin afin de regagner des volumes a eu un impact fort sur la stratégie logistique. Ceci a conduit naturellement la direction d'EASYDIS à mettre en place un plan d'actions baptisé « Perform2016-2018 ». Ce programme avait pour enjeux et objectifs :

- Initier et pérenniser une démarche d'amélioration continue partagée par l'ensemble du personnel ;
- Instaurer un nouveau canal de communication entre les opérateurs et le management.

Pour parvenir à l'atteinte de ses objectifs, l'équipe « Perform 2016-2018 » a engagé un plan de formation à destination, dans un premier temps, des équipes pilotes et managériales. Il était attendu une phase de sensibilisation aux méthodes d'amélioration continue et une formation pratique de mise en situation professionnelle.

Dans ce cadre, nous avons mis en place 2 formations distinctes (sensibilisation, expertise) dans le PerformanceLab à destination des chefs de projets et des responsables d'exploitation de sites logistiques EASYDIS, ainsi qu'un programme d'accompagnement terrain (consultation, audit, ...) qui nous a amené à former environ 400 collaborateurs d'EASYDIS, et réaliser une quinzaine d'audits de plateformes logistiques du groupe CASINO.

#### **2018 -                      Participation au projet ESCAPAAD**

Face aux limites des méthodes traditionnelles de pilotage industriel (MRPII [ORLICKY 1975], Lean et Théorie des Contraintes), deux praticiens américains, Carol Ptak et Chad Smith, ont créé en 2011 une méthode « hybride » : le Demand Driven MRP. Au fil des ans, une communauté s'est constituée et la méthode enrichie. De nombreuses entreprises, dont de grands groupes industriels (Michelin, Shell), se sont lancés dans son utilisation avec succès, et les cas de mise en place dans l'aéronautique sont rares mais montrent des résultats prometteurs.

Le projet ESCAPADD (**E**tude et **S**imulation des **C**ontextes **A**éronautiques **P**ropices à l'**A**pproche **D**emand **D**riven) a but pour de donner une vision objective de la méthode pour la Supply Chain Aéro. Le contexte de cette étude nous est offert par une collaboration avec l'association SPACE (Supply chain Progress towards Aeronautical Community Excellence). Il s'agit d'une association de 201 entreprises membres intervenant à tous les niveaux de la supply chain aéronautique. Ils bâtissent

ensemble les plans d'actions pour atteindre des performances de la supply chain d'un niveau international.

Il se déroule en plusieurs étapes :

- L'identification des pratiques de pilotage et des terrains, a priori favorables à l'adoption de DDMRP,
- La proposition d'une grille d'auto-évaluation pour que les entreprises puissent valider ou non leur intérêt à entreprendre une démarche DDMRP,
- Les Etudes « terrain » d'entreprises identifiées comme « éligibles »,
- La Simulation numérique permettant de comparer les résultats de ces entreprises en mode DDMRP vs MRP2.

## 2018 - Co-encadrement de la thèse de Stéphanie BAYARD

« Positionnement et dimensionnement des stocks de découplage pour les systèmes de pilotages de production confrontés à une demande variable et des nomenclatures complexes : enjeux industriels et économiques »

*Xavier DELORME, Professeur, Mines Saint-Étienne (Directeur de thèse), Frédéric GRIMAUD Maître-Assistant, Mines Saint-Étienne (Co-encadrant).*

L'ensemble des publications réalisées à partir de ces projets, encadrements de thèse et contrats industriels est repris à la fin de ce manuscrit.

## INGÉNIERIE DE PLATEFORMES

Au regard des travaux présentés dans les précédentes parties, une réflexion sur le meilleur moyen de pouvoir les intégrer m'a amené à m'intéresser plus particulièrement à la notion de plateforme. Cette notion assez vague nécessite encore aujourd'hui des explications tant son périmètre peut être large et varié (plateforme de formation à distance, technologie, de R&D, ...)

L'objectif était de pouvoir rassembler dans un même endroit physique (la plateforme) les outils et méthodes permettant un travail collaboratif (enseignants, chercheurs, industriels, institutions, étudiants) autour de preuves de concepts. Ceci passe par un découplage des activités des différents utilisateurs de la plateforme, par un business model partagé et soutenu par l'ensemble des parties-prenantes du projet.

Comme indiqué dans la partie « Responsabilité managériales » de ce Curriculum Vitae, la notion de management de projet et de management par le projet est la pierre angulaire du développement de ces plateformes (de l'idéation à la maintenance en condition opérationnelle en passant par la réalisation).

Le chemin fut long jusqu'à obtenir un objet permettant de réaliser en grande partie cet objectif. Je suis passé par la création de différentes plateformes, avec à chaque fois un périmètre fonctionnel

croissant. Ce cheminement n'est pas terminé, car on voit à ce jour se créer des réseaux de plateformes, soit en interne aux établissements, soit inter-établissements. J'y reviendrai dans les perspectives, et plus particulièrement dans mon projet de recherche avec le développement actuel de la plateforme IT'mFactory et le projet d'implantation à Lyon de Mines Saint-Étienne avec DIWII (Digital Intelligence Way for Industry Institute).

### INEXO : une première plateforme Lean basée sur le modèle allemand

Un constat établi en octobre 2006 sur l'industrie en France identifiait clairement l'excellence opérationnelle comme un des leviers majeurs d'amélioration de la compétitivité des entreprises françaises (rapport de McKinsey - Donner un nouvel élan à l'Industrie en France).

Pour répondre à cet enjeu, le cabinet de Luc Chatel (Ministère de l'Industrie) a initié en juillet 2008, avec un groupe de spécialistes, une réflexion sur la diffusion de l'excellence opérationnelle en France. En décembre 2008, ces travaux ont débouché sur le plan Qualité & Performance 2010 dont l'un des axes majeurs était l'amélioration et le renforcement de l'enseignement de l'excellence opérationnelle.

La décision de créer des usines modèles, avec un premier pilote en Rhône-Alpes, a été prise avec pour objectif de moderniser l'image de la production en France et d'aider les écoles et les entreprises à former les futurs acteurs de l'excellence opérationnelle dans un environnement très proche du milieu industriel.

À titre personnel, cette opportunité me permettait de m'investir dans un nouvel environnement (entreprise de conseil), et sur une thématique de R&D, l'excellence opérationnelle, connexe avec mes précédents travaux.

Ce projet me donnait également l'occasion de me rapprocher d'entreprises régionales et d'y nouer des contacts qui déboucheront au final sur des contrats industriels, des projets d'étudiants, et des relations professionnelles qui m'ouvriront plus tard des portes intéressantes en lien avec mes activités de recherche.

Située sur le campus de l'ECAM à Lyon, l'Institut de l'excellence opérationnelle (INEXO) a donc été un projet innovant avec pour but d'aider les écoles et les entreprises à former les futurs acteurs de l'excellence opérationnelle dans un environnement très proche du milieu industriel.

Grâce à la formation reçue, ces acteurs de l'excellence opérationnelle étaient capables d'appliquer dans leurs entreprises les méthodologies permettant d'améliorer la performance dans tous les domaines : sécurité, productivité, qualité, ambiance de travail...

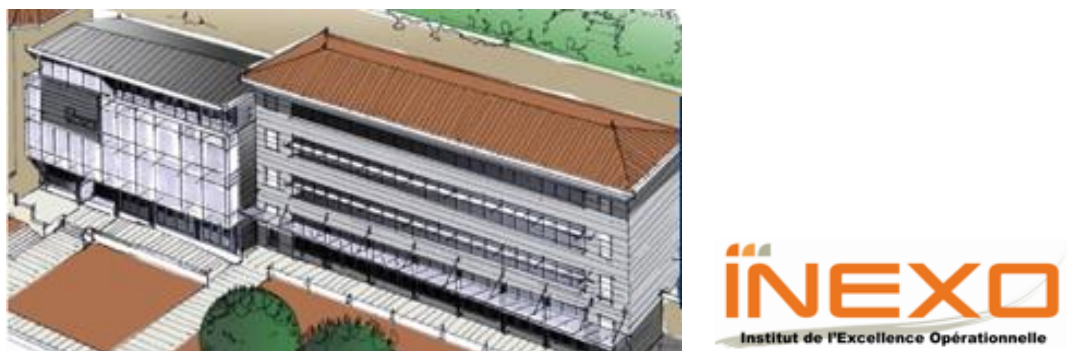


Figure 1 : Maquette du bâtiment INEXO

Au-delà des bénéfices communs (partage d'expériences, échange de knowledge, réputation lean), l'usine modèle INEXO reposait sur un effort conjoint de 3 catégories de partenaires et a procuré des bénéfices importants pour toutes les parties :

- Le cabinet McKinsey : formation des consultants et des clients, montée en compétence et approfondissement du savoir-faire Lean, forum pour des événements McKinsey (MMP et OPS)
- Les Écoles partenaires (ECAM, École Centrale Lyon, Mines Saint-Étienne, Arts et Métiers Paris Tech Cluny, ISARA Lyon) : enseignement unique dispensé aux étudiants, moyen de se faire connaître dans l'industrie, perspectives de projets de recherche,
- Les PME/PMI : Organisation et participation à des séminaires et des forums, formation des employés, contact avec des étudiants et mise en situation, possibilité d'associer son image à celle de l'usine modèle.

La plateforme est constituée d'un ensemble de postes de travail agencables en fonction du besoin. Un travail de scénarisation a été réalisé pour proposer 4 configurations d'un atelier manufacturier, allant d'une architecture et organisation dysfonctionnant jusqu'à l'intégration de tous les concepts Lean.

Ce projet a donc été pour moi l'occasion de me former à l'excellence opérationnelle via un cabinet de consulting reconnu comme McKinsey. Son approche, sa méthodologie et ses outils me servent tous les jours.

3 formations ont été construites par l'ensemble du groupe projet (réparti en groupes de travail) en collaboration avec McKinsey :

- « 1 jour » à destination des dirigeants d'entreprise
- « 5 jours » à destination des cadres intermédiaires
- « 11 jours » à destination des Lean manager, en charge des projets opérationnels (ci-dessous le découpage thématique des 11 modules)

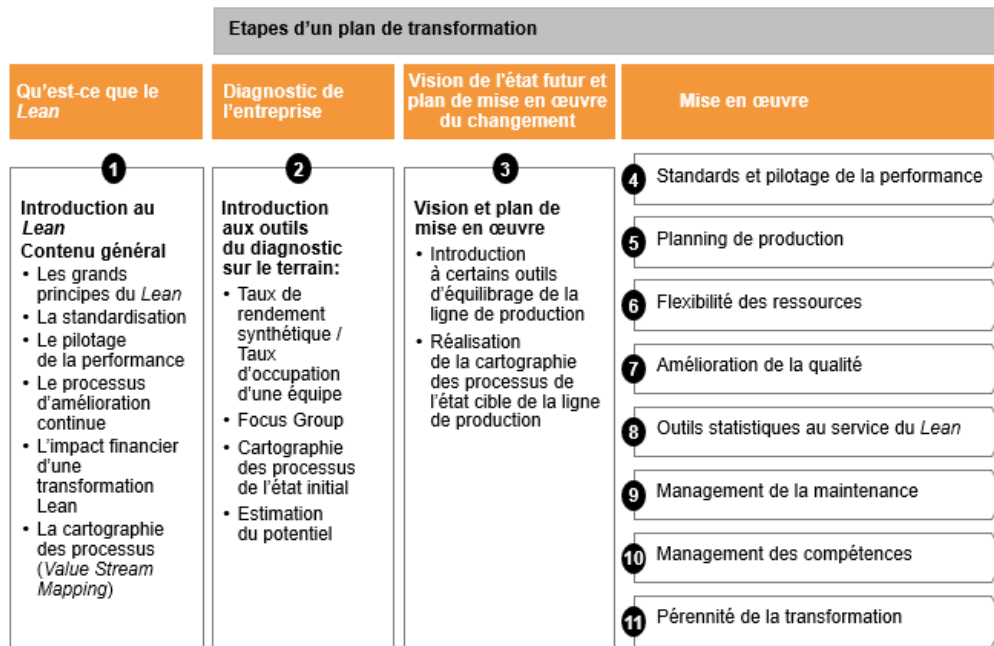


Figure 2 : Maquette des formations INEXO

Dans ce cadre, environ 120 cadres de plus de 70 PME/PMI ont été formés à l'excellence opérationnelle. J'ai assuré une vingtaine de jours de formation pour ces cadres, notamment sur les outils de flux du Lean Manufacturing.

Cette expérience m'a permis également de concevoir, comme décrit dans la partie « Conceptions et Animations pédagogiques » de ce Curriculum Vitae, une formation « Excellence Opérationnelle » à destination de nos élèves ICM.

### PerformanceLab : Une deuxième plateforme à vocation plus systémique

En 2011, l'Institut Henri FAYOL (IHF) était créé pour rassembler les forces de l'École des Mines de Saint-Étienne (EMSE) autour d'un thème central : la performance globale des entreprises. Au même moment, s'initiait le Campus Industriel à Saint-Étienne, avec ses espaces dédiés à des laboratoires d'essai, et sa proximité avec un ensemble d'entreprises prêtes à mettre en place un partenariat Industrie-Enseignement/Recherche.

Suite à la création de l'Institut Henri Fayol, du Campus Industriel et de l'expertise acquise avec le projet INEXO, est né le PerformanceLab. Les objectifs étaient de construire sur le territoire ligérien un réseau d'acteurs autour de la performance globale des entreprises, avec pour cœur de cible les PME/PMI, d'y conduire un ensemble de formations/actions à destination de nos élèves et des entreprises, et de cristalliser ces actions autour d'un atelier-école.

Le PerformanceLab est donc un réseau d'acteurs, porté par l'École des Mines de Saint-Étienne et l'ISTP, qui rassemble des institutionnels comme l'ANACT, VIAMECA, AIP-RAO ainsi que des entreprises telles que PCI, THUASNE, FIPROFIL et des acteurs de formation comme l'IRUP. Il se situe sur le Campus

Industriel, rue Copernic à Saint-Étienne et il s'appuie sur un atelier de fabrication « MyKey3D » et un portefeuille de formations. Son objectif est de travailler autour de la performance globale des entreprises. Il s'agit de conduire un ensemble de formations/actions et de les cristalliser autour de MyKey 3D.

Au sein de PerformanceLab, le comité d'organisation stratégique regroupant des représentants de l'EMSE et l'ISTP a défini le périmètre d'action suivant : travailler sur la transformation de l'entreprise, depuis les aspects stratégiques et tactiques (l'entreprise dans son territoire, la structuration de l'entreprise, les produits/process) jusqu'aux aspects opérationnels (Excellence Opérationnelle, process).

Ce projet était essentiel pour une École comme Mines Saint-Étienne, car il a permis de fédérer des équipes d'enseignants-chercheurs sur des projets transverses, alliant la formation, le transfert et la recherche. Nous le verrons encore plus dans le projet suivant ITmFactory, mais ce type de plateforme rapproche le monde industriel, le monde de l'enseignement et le monde de la recherche à travers des objectifs communs.



Figure 3 : Aménagement du PerformanceLab

MyKey3D est un atelier-modèle d'une surface d'environ 100 m<sup>2</sup> et proposant un ensemble de matériels et de moyens de production permettant la conception et la construction de goodies (porte-clés, clés USB, objets connectés) personnalisables.

On y retrouve des logiciels de conception (CAO, CAO 3D, CFAO), une machine de découpe papier numérique, une imprimante 3D, des machines de laminage, des fours de cuisson, et des postes de montage, de contrôle qualité et d'expédition.

Cet atelier-modèle est entièrement modulable, et constitue un support technologique, basé sur le concept pédagogique « Learning by Doing », aux briques de formations pédagogiques décrites ci-dessous.

Il est à noter qu'une demande de financement a été déposée auprès de Saint-Étienne Métropole par l'ISTP pour le développement de l'atelier MyKey3D, son fonctionnement et les prestations associées.

L'objectif principal était de mettre en œuvre un processus d'apprentissage de briques pédagogiques élémentaires (un concept bien identifié à la fois) en 4 grandes phases :

1. Apports théoriques,
2. Mise en œuvre dans l'atelier-modèle,
3. Confrontation avec une réalisation industrielle,
4. Mise en œuvre industrielle en relation avec le profil de l'apprenant.

L'ensemble des briques pédagogiques devait permettre de couvrir les cinq macro-compétences suivantes :

1. Être capable de comprendre son entreprise et de la positionner dans son environnement,
2. Comprendre le cycle de vie d'un produit,
3. Être capable de remettre en cause et concevoir le système de production dans son environnement,
4. Être capable de piloter et de construire un ensemble de portefeuilles de projets pour gérer la transformation de l'entreprise,
5. Être capable d'optimiser la performance globale en termes de Coût, Qualité, Délai, Sécurité et Environnement.

L'assemblage de ces briques pédagogiques permet de construire des formations personnalisées et répondant à une demande bien spécifique pour les PME, PMI et ETI.

Un parcours à la carte a été mis en place. Il consiste en un ensemble de briques qui permettent de mettre en place des parcours pédagogiques à destination des formations initiales, sous statut salarié ou tout au long de la vie. Cet ensemble représente 180 heures autour du renouveau industriel et de domaines plus spécifiques tels que « le diagnostic de flux » ou « la résolution de problèmes ». Ces sous-projets ont permis ces dernières années d'asseoir le concept PerformanceLab, de le faire connaître et de le tester auprès d'entreprises et de nos étudiants.

Rappelons que la plateforme est là pour faire de la recherche à vocation industrielle, transférer les connaissances via des projets communs avec l'industrie et via la formation.

Cette plateforme m'a permis de piloter et réaliser de nombreux projets en relation avec des industriels ; notamment sur la mise en place de projets d'entreprise d'« amélioration continue ».

### IT'mFactory, une plateforme dédiée Industrie du Futur

IT'mFactory consiste en un maquettage sous forme de plateforme expérimentale de ce qui pourrait être le point à atteindre d'une transformation numérique réussie d'une entreprise à moyen terme. Elle constitue donc la cible, telle que l'Institut Fayol la conçoit, visée par une entreprise et plus particulièrement les TPE/PME/PMI - en termes de développements industriels de demain.

Ce projet a été cofinancé par Mines Saint-Étienne et l'UIMM Loire (budget global d'environ 1 M€). Un équipe projet de 15 enseignants-chercheurs, que je pilote, a travaillé pendant plus de 2 ans pour concevoir, mettre en œuvre et développer des scénarii pédagogiques et des preuves de concepts R&D innovants.

Cette plateforme est le support principal de mon projet de recherche que je développe dans le chapitre 3 « Projet de recherche autour d'IT'mFactory » de la partie principale de ce mémoire. Une description plus détaillée de cette plateforme, de l'offre et des projets de Recherche & Développement qui y sont, et seront, menés y est présentée.

## **RESPONSABILITÉS MANAGÉRIALES**

---

Avec plus de vingt années d'expérience professionnelle en tant qu'enseignant-chercheur, je pense que les compétences les plus transverses que l'on a à mobiliser concernent la gestion de projet et le management par projet.

Je ne vous ferai pas l'affront de vous réexpliquer ce que nous avons tous déjà vu et revu dans les formations ou séminaires sur la gestion de projet, mais je voudrais m'attarder sur la partie immergée de l'iceberg, qui fait que, selon une étude du PMI ( Project Management Institute), plus de deux projets sur trois échouent sur les délais, les coûts et les objectifs visés. La méthode y-a-qu-à-faut-qu-on tant décrite dans de si nombreux ouvrages ne fonctionnerait donc t-elle pas ? Pas si simple à vrai dire... Je profite de ces quelques pages pour vous faire partager mon retour d'expérience sur différents types de projets académiques, industriels, organisationnels, ...

Mon premier retour d'expérience concerne une rencontre avec une psychologue du travail qui a finalement profondément changé ma vie professionnelle. La méthode MBTI (Myers Briggs Type Indicator), qui est un outil d'évaluation psychologique déterminant le profil psychologique d'un sujet en suivant une méthode proposée en 1962 par Isabel Briggs Myers et Katherine Cook Briggs, a été pour moi d'une grande aide dans la gestion des projets. Elle sert à identifier les dominantes psychologiques des personnes dans un cadre managérial ou de relations interpersonnelles. Une fois que l'on a compris que les autres ne vous voient pas comme vous vous voyez, et qu'il existe de nombreux profils différents, la relation entre les différents membres d'un projet vous semble d'une seul coup plus limpide. Le fait de pouvoir identifier grossièrement le profil de vos interlocuteurs et de connaître les types d'interactions à privilégier avec eux en fonction de votre propre profil permet d'éviter d'inombrables écueils assez classiques en gestion de projet.

Au fur et à mesure que passent les années, il devient pour moi une certitude que nous devons nous recentrer sur l'essentiel (différent pour chacun), et n'en garder que la substantifique moelle. C'est vrai aussi pour la gestion de projet. Au final, je redécouvre ce que j'avais trouvé simpliste lors de mon expérience du service militaire lorsque dans les formations d'élèves gradés, on nous apprendait une méthode, devenue pour moi incontournable, la méthode PIF : Point à atteindre, Itinéraire, et Formation. En résumé, ces trois éléments (quels sont les objectifs, par où allons nous passer, et comment

nous structurer pour y arriver) sont largement suffisants pour survivre en tant que chef de projet. Il s'agit en fait des sujets qui sont tellement évidents que personne n'ose les aborder, et de ce fait, il n'y a aucun alignement entre les membres de l'équipe sur les objectifs, les rôles, les organisations visés.

Le troisième retour d'expérience concerne la délégation. Il est souvent plus facile de faire que de faire faire, et il est beaucoup plus facile de critiquer le travail d'autrui que le sien. Il faut au final accepter, pour le bien du projet, que tout ne se passe pas comme on l'avait conçu, voulu, et il est vain parfois de vouloir le faire à nouveau rentrer dans les fourches caudines de votre représentation interne. Il faut savoir trouver le bon compromis, et se satisfaire du bilan positif exprimé soit par le client soit par le groupe projet, même si on ne le partage pas complètement.

On pourrait penser que ce dernier point est antagoniste avec la notion de PIF précédemment donnée, mais elle est au contraire complémentaire. Il faut arriver à structurer les PIF non pas par rapport à sa propre vision de l'objectif, mais par rapport à une vision partageable avec toutes les sensibilités et profils du groupe projet. Cet exercice permettra une souplesse évitant de se mettre en porte-à-faux vis-à-vis du reste du groupe, au risque de paraître rigide ou sourd aux remarques.

Une autre désillusion, qu'il faut absolument intégrer pour en faire une force, est la difficulté de communication via les écrits. Il est illusoire de penser que parce que l'on écrit un mail, il sera lu, et que si l'on écrit un compte-rendu ou tout document de synthèse, il le sera également... Que le premier lecteur qui a lu tous les mails et tous les documents qui lui ont été envoyés me jette la première pierre ! Ne croyez pas que, parce que c'est vous, et donc que c'est forcément plus intéressant que le reste, il y aura un contournement à cette règle. Au final, on passe beaucoup de temps sur ces objets sans réelle valeur ajoutée. La communication doit être directe, simple et répétée et à double sens, pour vérifier que la connexion a été établie. Mieux vaut un aller-retour dans un bureau ou un échange par téléphone ou visio qu'un long écrit. La valorisation de l'autre est un passage essentiel pour obtenir une mobilisation de l'équipe en générale.

La remarque vaut aussi pour tous les systèmes de stockage (cloud, ...) les plus sophistiqués qui au final ne servent que de salle d'archives au projet, et sont généralement déconnectés de la vraie vie du projet. On rejoint là le paradoxe du RAQ (Responsable Assurance Qualité) et du RAC (Responsable Amélioration Continue) qui vivent parfois dans des mondes parallèles l'un sachant comment en théorie on devrait faire, et l'autre en pratique pourquoi on fait autrement...

Ces quelques remarques me viennent directement de mes expériences passées de manager, expériences que je vous propose de détailler.

### Chargé de mission « Relation Mines Saint-Etienne - ISTP »

Ma première expérience a été d'être intégré au sein de la Direction des Formations de Mines Saint-Étienne comme chargé de mission (2003 – 2006) auprès de son directeur pour coordonner les interventions des enseignants-chercheurs de l'École dans notre institut de formation sous statut salarié (Institut Supérieur des Techniques Productiques).

Cette mission complètement transverse m'a permis de mettre en œuvre des outils simples d'échange entre les deux structures (avec des systèmes d'informations différents) et de manager une assistante, que je remercie chaleureusement ici, car elle a subi mes errements managériaux de débutant. Cette mission a été également l'occasion sur sa fin de travailler à la rédaction d'une convention de réciprocité (de nos jours on dirait gagnant-gagnant...) entre les deux établissements qui existe toujours aujourd'hui et à la réalisation d'un audit sur le rapprochement des systèmes d'information et de l'alignement des actions entre les deux partenaires.

Une mission très enrichissante qui fait qu'aujourd'hui encore j'ai une relation privilégiée avec la direction des formations, à travers ma participation au comité des études, organe de régulation et d'harmonisation des résultats et des choix de parcours des étudiants.

### Directeur-adjoint du centre G2I

Cette expérience a débuté en 2006 et s'est poursuivie jusqu'en 2011 au sein de G2I (Génie Industriel et Informatique, ou Génie Informatique et Industriel, on n'a jamais vraiment statué...).

Le centre G2I était un centre d'enseignement, de recherche et de transfert en « Information Technologies » pour les systèmes industriels en utilisant des méthodes d'optimisation, les nouvelles technologies d'Internet et la gestion de l'information numérique pour :

- L'aide à la décision pour la conception, configuration et reconfiguration des systèmes industriels,
- La planification de leurs ressources et des matières,
- Le pilotage décentralisé et coopératif.

Les deux thèmes principaux étaient :

- Technologies de l'Information pour la conception et l'optimisation des produits, procédés et systèmes de production,
- Modélisation, couplage et pilotage des organisations, services et logiciels

Cette expérience m'a permis de mettre une main, puis un bras... dans la gestion opérationnelle d'un centre d'enseignement et de recherche d'une soixantaine de personnes. Les missions étaient au final de gérer administrativement et financièrement les projets de formation, de transfert et de recherche du centre, en lien avec leurs porteurs. Les budgets annuels étaient aux environs de 400000 euros avec un portefeuille d'environ 30 actions collectives actives.

Cette expérience m'a permis de découvrir et de travailler avec l'ensemble des services supports de l'École (services généraux, services financiers, services RH, direction des études, direction de la recherche, ...). Elle m'a permis également de découvrir certains de mes collègues de travail sous un autre angle ...

Ces années en tant que directeur-adjoint du centre G2I ont été très formatrices, très structurantes sur la vie d'un établissement, dans lequel à mon grand étonnement, de nombreuses personnes

considèrent que les moyens financiers et humains dont on dispose pour travailler sont le fruit d'une source magique, intarissable et connue uniquement de la direction. Le premier travail de fond a été de travailler sur l'appartenance des enseignants-chercheurs à l'École et faire passer le NOUS avant le JE.

### Directeur-adjoint du laboratoire LSTI

De 2006 à 2011, j'ai également occupé la fonction de directeur-adjoint du laboratoire LSTI (laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information) qui regroupait l'ensemble des enseignants-chercheurs du centre G2I plus une équipe du centre « ingénierie et santé » et une personne du centre « matériaux », et une personne du centre « Environnement ». Les thématiques du laboratoire LSTI étaient regroupés autour du développement de modèles et d'outils pour :

- Simuler et optimiser les propriétés de biens ou services, car la maîtrise de leur complexité et de leur variabilité échappe le plus souvent à l'expertise humaine,
- Organiser et optimiser la production de ces biens et services à moindre coût, en respectant la demande évolutive des clients, dans une dynamique d'amélioration permanente,
- Mettre en œuvre et maîtriser les systèmes d'information, de plus en plus complexes, liés à ces biens et services.

Dans ce cadre, nos objectifs avec le directeur du LSTI étaient pour les 4 équipes constitutives :

- Augmenter la visibilité et l'attractivité de nos activités de recherche,
- Augmenter le nombre de publications dans des revues scientifiques de haut niveau et dans les actes de conférences sélectives,
- Accroître le nombre d'HDR dans le laboratoire de sorte que chaque thématique ait au moins un.e HDR,
- Faire en sorte que tous nos domaines de recherche soient supportés par des formations de masters de recherche,
- Augmenter notre présence dans les réseaux régionaux, nationaux et internationaux,
- Faire de notre rayonnement international un facteur d'attractivité pour nos recrutements d'enseignants-chercheurs et de doctorants.

J'ai participé également à la mise en œuvre du rapport AERES « bilan » et du rapport « perspectives » en 2010 de ce laboratoire de rattachement, ainsi qu'à l'accueil du comité d'évaluation. En 2012, le LSTI et ses structures ont été fermés. J'ai alors rejoint, comme une partie des membres du LSTI, le laboratoire UMR CNRS 6158 LIMOS, auquel j'appartiens toujours.

Cette incursion dans la vie d'un laboratoire a également été pour moi très formatrice, tant sur le point de la mise en œuvre d'une stratégie de recherche, que sur la mise en valeur des actions de recherche menées au sein du laboratoire et leur mise en synergie pour présenter un bilan et un projet structuré et lisibles pour les évaluateurs. Ces compétences me servent régulièrement à la relecture de projet R&D

à déposer, pour se mettre à la place du lecteur/évaluateur et vérifier une fois de plus l'alignement du contenu avec les objectifs visés lors de l'appel à projet, ou tout simplement à la relecture/modification d'un manuscrit de recherche (thèse, revue ou article, voire poster). Cette vision globale ou intégratrice est essentielle pour donner du sens au document.

### Directeur-Délégué au Monde Économique de l'Institut FAYOL

En 2012, le centre G2I, le département management et le centre SITE (Environnement) ont été fusionnés par la direction de l'École pour donner naissance à un objet alors bien particulier dans notre environnement, l'Institut Henri FAYOL. Objet bien particulier car il a été voulu dès l'origine multithématiques, pouvant ainsi répondre aux projets souvent transverses des entreprises.

Ce fut pour moi l'occasion de continuer l'aventure managériale de G2I avec un autre directeur, et une autre fonction, celle de Directeur-Délégué au Monde Economique. Le périmètre de l'Institut Fayol étant plus important, il a été proposé de scinder en 3 le rôle du directeur-adjoint, avec une partie Formation, une partie Animation de la Recherche, et une partie Relation avec le monde économique. J'ai occupé cette fonction de 2012 à 2016.

Le principal objectif de ces 5 années, outre la gestion des contrats/partenariats et des relations avec les différents services-soutiens de l'École, a été de mettre en œuvre un véritable management par projet : transformer les actions en projet, avec toute l'implication que cela peut avoir sur les périmètres, les rôles, les mécanismes de régulation inter-projets. Il aura fallu deux ans de travail, d'explications, de découragement parfois... pour aboutir à une organisation qui aujourd'hui continue d'exister au sein de l'Institut. Cette organisation, en avance de phase par rapport aux autres centres de l'École, est aujourd'hui considérée comme le fonctionnement normal d'un centre.

Les objectifs de cette organisation étaient :

- Proposer un cadre commun pour l'Institut FAYOL, qui pouvait être vu comme la fusion de centres et départements aux objectifs et fonctionnements hétérogènes,
- Gérer un portefeuille d'activités important (environ 90 personnes, environ 40 contrats R&D, 40 projets Formation, 5 projets « organisationnels », environ 20 projets en cours de montage, environ 1,3 M€ de Chiffre d'affaire (hors formation) par an
- Maitriser une complexité importante et croissante (différents guichets de gestion, politique financière de la tutelle, contexte économique difficile, difficultés de recrutement, Règles de montage de projets et justificatifs de complexité croissante)
- Préparer l'avenir (se préparer et s'adapter aux évolutions des fonctions, se structurer en cohérence avec les métiers « ÉCOLE », Organisation flexible à l'évolution de la charge/capacité, organisation robuste aux aléas)

Cette organisation avait pour élément pivot une équipe de l'Institut Fayol que je pilotais et qui s'appelait « Fonctions supports ». Cette équipe était constituée d'assistantes et de développeurs informatiques.

Les missions de cette équipe étaient globalement le suivi de l'infrastructure réseau en lien avec la DSI (Direction des Systèmes d'Information), la gestion du parc informatique (matériel et logiciel), les développements logiciels, et l'assistance projet (enseignement, transfert, recherche).

Son organisation a été pensée pour répondre au cahier des charges « qualité de services » suivant :

- Etre entièrement dédiée à la réalisation des missions décrites ci-dessus,
- Etre simple et lisible en interne comme à l'extérieur de l'Institut,
- Permettre d'assurer une continuité de service tout au long de l'année,
- Etre robuste et flexible par rapport au mix des activités actuelles et à venir notamment grâce à la mise en place de poly-compétences,
- Permettre aux personnes concernées de travailler en toute autonomie selon des procédures simples et partagées de tous.
- Garantir aux personnes concernées de bonnes conditions de travail, des missions variées en accord avec leurs compétences.

En termes de mise en œuvre opérationnelle, le travail a été mené pour permettre une organisation centrée sur la notion de projet, quel que soit son type (formation, recherche, transfert, ...). À chaque projet, sont rattachés un responsable scientifique projet et une assistante administrative. Un projet est également rattaché à un département de l'Institut.

Une plateforme collaborative propose par projet, un espace dans lequel on retrouve une zone « intranet » contenant toutes les informations inhérentes à la gestion administrative, budgétaire, RH, ainsi qu'à la communication interne, et une zone « extranet » permettant de diffuser et de partager de l'information avec des membres extérieurs à l'école. Un relevé des dépenses associées au projet est également disponible dans cet espace,

Un workflow de la vie d'un projet a été mis en place, et sert de fil conducteur pour la gestion au sens large du projet, avec par département, un espace collaboratif permettant l'échange et le stockage des informations nécessaires à la vie du département, ainsi qu'une consolidation budgétaire des différents projets, personnels, ...rattachés à ce département. Cet espace contient :

- Une zone de partage des informations liées aux différents appels à projets en cours,
- Une zone de partage d'outils liés à la mise en place d'un nouveau projet (choix support EPA/ARMINES, consolidation du budget, couts de référence, calcul de marge, ...),
- Une zone regroupant l'ensemble des procédures et/ou bonnes pratiques, ainsi que les divers documents et/ou outils (à télécharger et/ou en ligne) qui leurs sont liés,
- Une zone de partage d'information et de stockage de tous les compte-rendus des divers comités mis en place dans l'Institut.
- Une zone d'accès limité permettant le stockage des informations liées aux ressources humaines.

- Une zone d'accès limité permettant de stocker les tableaux de bord de direction, agrégeant et consolidant les budgets des départements, et intégrant l'ensemble des dépenses liées à l'infrastructure de l'Institut (téléphones, maintenance, abonnements, ...).
- Une zone d'archivage

5 – Le mini-site FAYOL & l'intranet SHAREMINES

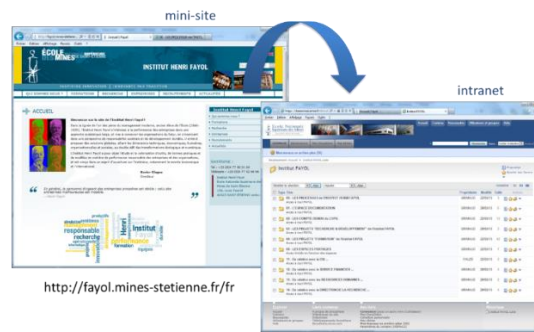


Figure 4 : Système d'information FAYOL

Cette structuration projet a été conjointement mise en œuvre avec la mise en place d'une structure de management, reposant sur le schéma ci-dessous permettant de définir les articulations des prises de décisions et des niveaux d'autonomie des chefs de projet, responsables d'équipe et direction du centre.

2 – Le choix d'une organisation orientée PROJET (3/4)

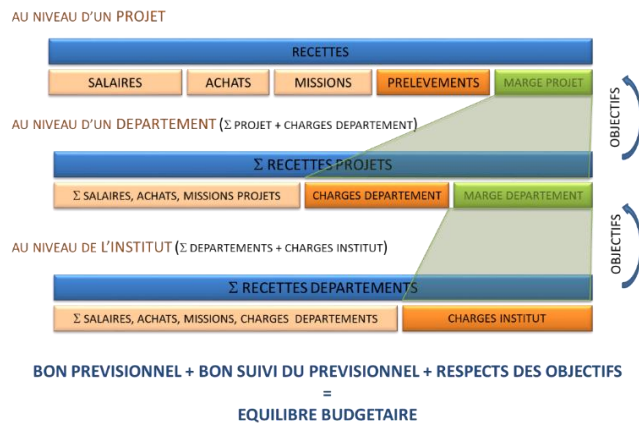


Figure 5 : Structure de management budgétaire FAYOL

Tout ceci ne pouvait fonctionner sans un alignement de l'ensemble des personnels sur la notion de projet (Un PROJET est en cohérence avec les objectifs de l'Institut Henri FAYOL, délimité et structuré dans le temps, conçu et piloté par un chef de projet, accompagné par un(e) Assistant(e) de projet, budgété en termes de recettes et de dépenses de RH /Sous-traitance/Achats et Missions, rattaché comptablement au département du chef de projet, réalisé par un ensemble d'acteurs, suivi par le chef de projet, le responsable de département et le COPIL).

Le processus « projet » a été construit collectivement et validé par le comité de direction FAYOL, en mettant en cohérence, les objectifs visés, la démarche proposée, l'accompagnement humain, et les supports informatiques de travail collaboratifs proposés.

La montée en compétence sur cette expérience a été très importante pour moi. Si l'on perçoit la démarche « ingénieur » sous-jacent à l'ensemble des documents proposés, elle l'a également été par l'ensemble des personnels touchés par cette réforme. Comme expliqué plus tôt, l'erreur aurait pu être de croire que ce travail suffirait et que tout se déroulerait normalement car la méthode proposée n'avait pas de lacunes ... C'est à ce moment-là que j'ai vu de nouveau ce qu'était la vraie gestion de projet, en accompagnant sa mise en œuvre avec des éléments de communication simples, et en travaillant à la pédagogie jour après jour. Certains documents sont par exemple restés à l'étape « confidentiel » car ils permettaient de synthétiser ma pensée, mais n'étaient clairement pas adaptés à la situation.

Cette expérience systémique m'a servi de nombreuses fois lors des projets de construction de plateformes détaillées dans ce Curriculum Vitae. Elle m'a guidé, et en prenant du recul, m'a autorisé à me sentir légitime en tant que pilote de projets de Recherche et Développement, où les compétences scientifiques aujourd'hui ne suffisent plus pour pouvoir exister dans le monde de plus en plus complexe des appels à projet, financements partenariaux, ...

En 2016, cette démarche projet a été globalisée au sein de l'École, et une structuration cohérente sur l'ensemble des centres a été opérée. Elle a conduit à la création de postes de RAF (Responsable Administratif et Financier) recrutés spécifiquement pour conduire ces actions, ce qui m'a permis de pouvoir m'investir sur un autre sujet qui montait en puissance, la création d'une plateforme Industrie du Futur : IT'mFactory.

### Responsable de plateforme R&D

Sans dévoiler le contenu du chapitre 3 de la partie principale de ce mémoire, ces dernières années passées à l'Institut FAYOL (2016 - ) ont été consacrées en partie au montage de plateformes et plus particulièrement de l'IT'mFactory, une plateforme R&D dédiée à l'industrie du futur.

Dans ce cadre, j'ai quitté mes fonctions de directeur-délégué au monde économique pour prendre la responsabilité du montage et de la réalisation d'une plateforme, dédiée aux PME/PMI, de sensibilisation, formation et accompagnement à la transition numérique des entreprises. Cette fonction m'a permis de rester membre du comité de direction FAYOL, en tant que responsable d'un projet de développement phare de l'Institut.

Cette expérience m'a permis de replonger dans le monde de la gestion de projet transverse avec non plus le pilotage d'un portefeuille de projets, mais avec la création quasiment ex-nihilo de cette plateforme.

Je passe rapidement sur les aspects technologiques et R&D que cela a pu impliquer et qui sont détaillés plus tard, et je vais m'attarder sur la partie managériale de ce grand projet. Son budget était d'environ 1 000 000 €, et l'équipe projet constituée d'une vingtaine de personnes, multi établissements, car le projet est cofinancé avec l'UIMM Loire.

Notre Institut est fortement sollicité en interne pour des actions de formation, et une des difficultés est de gérer le ressourcement pour nos actions de transfert et de R&D. Pour ces raisons, la principale mission managériale a été de travailler sur la motivation du groupe projet, et son implication dans les phases de brainstorming, d'idéation, de conception et de réalisation de la plateforme. Ce projet ne devait pas être perçu comme MON projet mais comme NOTRE projet.

La grande leçon de cette expérience aura été de vérifier, une fois de plus, que la vraie richesse d'une telle plateforme, n'est pas le montant HT des investissements qui y ont été faits (même si c'est très important et nécessaire !), mais le réseau d'expertises et de compétences construit et activable pour que la plateforme soit pérenne (sinon, il s'agit d'une collection de technologies aux allures de musée ...). Cette richesse, qui constitue pour moi la partie immergée de l'iceberg Plateforme, confirme, s'il fallait le souligner une fois de plus, que la dynamique de recherche et développement autour d'un sujet ne peut se faire sans un collectif, aligné sur une méthodologie et des objectifs personnels et globaux cohérents. N'oublions pas que nous avons, en tant que manager dans des établissements d'enseignement de recherche, à gérer des « troupes de chats » ...

### Co-encadrant de thèses

J'ai eu l'opportunité de co-encadrer 9 thèses à l'École Doctorale EDSIS. 9 expériences différentes, autant sur le point humain que scientifique.

De ces expériences, je garde l'idée essentielle que lorsqu'on encadre une thèse, on sert de miroir et de guide méthodologique au doctorant. Il ou elle attend de nous qu'on lui permette de se poser les bonnes questions, afin qu'il y trouve les bonnes réponses. En d'autres termes, l'objectif n'est pas d'être directif en découpant en tâches tellement petites les actions à réaliser qu'elles en deviennent incompréhensibles, ni d'être un modèle à reproduire, une sorte de guide spirituel de la recherche. La gestion de cet équilibre instable, car spécifique à chaque personne, pour chaque sujet, fait de ce travail une activité passionnante où la routine ne peut s'instaurer. Donner du sens aux actions proposées, et faire en sorte que le doctorant ait la magnifique impression de définir sa route est le saint graal de l'encadrant. Très difficile, mais au combien gratifiant lorsqu'on y arrive.

Le propre d'un projet de recherche, et d'une thèse en particulier, est justement de ne pas savoir avec certitude où se trouvent les verrous scientifiques, et par définition de ne pas savoir comment les résoudre à court terme (sinon, ce n'est pas un verrou scientifique...). L'accompagnement de cette certitude d'incertitudes est primordial pour le doctorant, dans sa propre définition et vision de la recherche : n'oublions pas que si l'objectif premier d'une thèse est de travailler scientifiquement un sujet et de produire des résultats, son objectif second (et pas secondaire) est de former ce futur

chercheur à lui-même piloter des projets de recherche et encadrer une équipe à moyen terme. Tout ce que nous écrivons dans cette partie management y trouve particulièrement écho.

L'analyse de risques est également extrêmement importante dans cet exercice, par rapport au profil du doctorant, par rapport à la niche ou l'effervescence des buzz-words du sujet en en faisant soit un élément de différenciation, soit un élément fédérateur pour une communauté scientifique.

Chacune des thèses coencadrées aura été pour moi avant tout une aventure humaine, une rencontre passionnante, des moments d'angoisse aussi car le déroulement d'une thèse « n'est pas un long fleuve tranquille ». Cette période de la vie du thésard restera à jamais marquée dans sa mémoire, à nous en tant qu'encadrant, de faire en sorte qu'elle soit un moment de référence et de construction pour son développement professionnel, qu'il soit dans le monde universitaire ou industriel.

Ces différentes expériences de management, dans le cadre de chargé de mission, directeur-adjoint, directeur-délégué au monde industriel, de responsable de plateforme, de chef de projet formation ou R&D, et de co-encadrant de thèse m'ont amené à construire un mode de fonctionnement bien personnel tel que décrit en début de cette partie, basé sur la confiance, le respect, la légitimité (vaste sujet) et la recherche de l'essentiel.

Avec du recul, il est certain que pour bon nombre des projets et expériences vécues détaillés dans cette partie, je ne procéderai pas aujourd'hui de la même manière. Je ne regrette absolument pas de les avoir gérés de la sorte, j'y trouve même un sentiment de fierté, et j'espère que si j'ai l'occasion de me pencher à nouveau dans dix ans sur mes pratiques managériales, je referai les mêmes constats qu'aujourd'hui. C'est en partie ces softskills qui constituent notre ADN d'enseignant-chercheur et nous donnent la possibilité d'avancer.

---

À travers la présentation de mes activités pédagogiques, mes activités de recherche & développement, mes expériences en ingénierie de plateforme et en management, j'ai brossé de moi un portrait je l'espère assez fidèle de mes compétences et de mon état d'esprit en tant qu'enseignant-chercheur.

La suite de ce mémoire revient plus en détail sur mes activités de Recherche & Développement, autour des thématiques « Simulation » et « Pilotage » des systèmes industriels.





*D'après ESCHER, les deux mains*

« Un environnement d'aide à la décision pour l'accompagnement des entreprises (PME) à la transformation dans un contexte d'industrie 4.0 »

**Frédéric GRIMAUD**  
Mines Saint-Etienne



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Issu d'un environnement familial où la pédagogie avait une place prépondérante, et où la volonté de partager son savoir était aussi important que d'en acquérir de nouveaux, un destin tout tracé de professeur de mathématiques me tendait les mains ... mais une rencontre, avec la famille GOURGAND, me fit en partie changer d'objectif, en intégrant une école d'ingénieur en informatique, et quelques années plus tard en me donnant la possibilité de faire une thèse en relation étroite avec un industriel, Michelin, pour y travailler sur la simulation des flux [LAW et al. 1999] de ses usines. Cette thèse m'a offert la possibilité de devenir enseignant-chercheur à l'École des Mines de Saint-Étienne, pour y réaliser des activités de formation, de transfert industriel et de recherche. L'histoire (la mienne en tout cas) montrera que c'est au travers de rencontres telles que celle décrite ci-dessus que je me suis construit professionnellement parlant et qu'au final, c'est sans doute uniquement cela qui restera important pour moi dans ma « carrière ».

Travailler sur la modélisation et la simulation des flux et l'organisation d'une entreprise n'a de sens que dans une optique de changement ou d'adaptation du système productif de cette entreprise en validant ou non, in vitro, des choix d'infrastructure, de processus de décision nouveaux. Ces modèles n'ont de sens que si l'on se trouve dans un cadre où la complexité des flux, les aléas et la dynamique des prises de décision font que la simple intuition ou « règle de trois » est inopérante.

Comment aider une entreprise face à cette problématique ?

Le propre d'une entreprise, petite ou grande, est de savoir adapter ses ressources (humaines, matérielles, financières) et son organisation (rôle, SI, workflow décisionnel, management) aux besoins de ses clients actuels ou futurs, et ce dans un monde fortement concurrentiel et évolutif. Elle dispose pour cela d'un ADN initial, et d'une stratégie d'entreprise qu'elle va pouvoir déployer à court, moyen et long terme.

Si l'on veut résumer cette problématique, il va lui falloir être agile, c'est-à-dire faire preuve de résilience (robuste aux aléas), être flexible, pour toujours avoir un temps d'avance et savoir anticiper.

Comme le dit le proverbe, « la force d'une chaîne est la force du plus faible de ses maillons ». Nous pouvons associer par analogie chaque terme utilisé précédemment à un maillon, et constituer notre chaîne « entreprise ».

À l'instar de l'organisation industrielle, qui consiste à trouver des solutions qui permettent d'améliorer des indicateurs antagonistes comme coût, qualité, délai, ..., l'entreprise au sens général doit trouver ses réponses en mobilisant des compétences, des moyens financiers et du temps. Ce sont, a priori, ces ressources critiques qui sont les principaux freins à son développement, si l'on met de côté le manque de stratégie.

Étant financé par une institution dépendant du ministère de l'industrie, il me paraissait incontournable de définir un objet de recherche qui soit en phase avec cette problématique et propose des axes de progrès en liaison avec ces principaux freins. Pour moi, la réponse à donner se devait d'être systémique [LE MOIGNE 1992].

Chaque entreprise a un positionnement spécifique par rapport au changement, et en particulier, par rapport à cette flexibilité qui devrait être permise par la « numérisation » de ses processus. Si l'on reprend la courbe de Hype, que l'on croise cela avec les compétences à un instant  $t$  d'une entreprise, et que l'on soumet ceci au prisme « avant-gardiste » ou « meneur/suiveur » des hommes qui y travaillent, on obtient une probabilité assez faible d'aller investir avec succès une nouvelle technologie ou organisation : « trop tôt », « pas assez de recul », « trop chère », « trop technique », « trop en avance de phase », « pas les compétences », « attendons que d'autres essuient les plâtres », « c'est trop bien, allons-y, on verra bien ce que l'on peut en faire », « les autres y vont, pourquoi pas nous », ... Ces assertions sont d'autant plus importantes dans le cadre des PME/PMI qui sont confrontées à une triple problématique : difficulté à mobiliser de nouvelles compétences, difficulté à se ressourcer financièrement, et manque de temps disponible.

C'est dans cette esprit général que je tente, lorsque c'est possible et opportun, de construire des solutions adaptées. Il nous faut donc proposer une méthodologie, ou tout du moins, un cadre de réponse qui prenne en compte ces faits, qui propose une approche incrémentale (ne parlons pas de rupture, mais de changement de trajectoire), qui puisse parler au maximum de personnes (de l'opérateur au chef d'entreprise), et qui propose une collection d'outils et méthodes adaptée pour faire progresser l'ensemble des maillons de la chaîne.

Croire que cette collection d'outils et de méthodes suffira à résoudre les problèmes est une erreur, comme le fait de construire un POC (proof of concept) sur un sujet donné suffira à le valider et l'instancier durablement dans l'entreprise. Le modèle de Moore explique bien ce gouffre entre POC et standardisation, et préfère parler de POV (proof of value).

C'est cette posture qui m'a amené durant ces 20 dernières années, à définir ma propre trajectoire, à la frontière de l'enseignement, du transfert industriel et du monde de la Recherche & Développement. Cette posture, avec un peu de recul, est assez complexe à tenir. On n'appartient finalement à aucune des communautés bien identifiées. Un enseignant-chercheur manque généralement cruellement de crédibilité lorsqu'il s'adresse à un industriel. Le problème n'est pas ses compétences, généralement bien reconnues à défaut d'être clairement identifiées, mais leur capacité supposée à lui servir à quelque chose ... « on » ne connaît pas son métier, son besoin, ses problèmes ... À l'opposé, s'intéresser de trop près et s'investir sur du transfert industriel, est généralement difficile dans un monde où la complexité seule du problème « intellectuellement parlant » est déjà si grande qu'on peut se demander légitimement pourquoi aller en rajouter une strate. Ces postures peuvent paraître excessives, et mériteraient sans doute d'être pondérées mais elles rajoutent à la difficulté « technique »

la difficulté « managériale » d'un positionnement « multi-culturel ». Passionnant, mais très souvent perturbant.

L'objet IT'mFactory, construit ces dernières années, est pour moi par exemple une étape clé de mon activité d'enseignant-chercheur en Génie industriel au sein de Mines Saint-Étienne et du LIMOS. Il est le fruit de nombreuses itérations, de cheminements parfois hasardeux, mais toujours en phase avec cette volonté de travailler pour le développement économique de mon pays en y amenant cette approche systémique et multiculturelle.

Ces vingt dernières années passées à travailler sur ce sujet m'ont autant apporté sur le plan scientifique que sur les plans humain, organisationnel, et managérial. C'est ce cheminement que je vais tenter d'analyser en relisant et en reliant les différents travaux antérieurs menés.

À l'origine, un simple schéma pour présenter ma problématique de travail aux journées de la recherche en 1998, présente bien maladroitement ma vision très académique des choses. On y retrouve cet ADN multiculturel et systémique, mais chaque chose est bien rangée dans une case et une approche très ingénieur est à peine dissimulable...

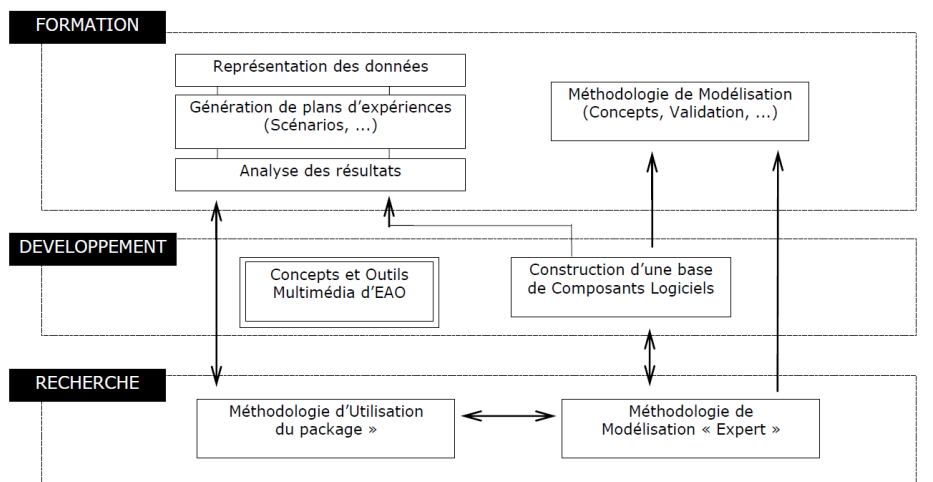


Figure 6 : Organisation des activités d'Enseignement / Recherche en 1998

Si l'on considère que chaque production que j'ai pu réaliser ou encadrer pendant ces vingt dernières années peut s'afficher, à la manière des impressionnistes, sous forme de touches sur une toile en 3 dimensions (représentant les aspects Formation, Transfert et Recherche), une chronologie toute relative définit assez bien cette volonté de travailler au fur et à mesure sur les 3 dimensions à la fois.

Au départ, j'ai eu un réel besoin d'acculturation industrielle (autre que celle que je connaissais, Michelin) et de m'ouvrir sur d'autres outils et méthodologies liés à la simulation. La rencontre avec B. JULLIEN m'a permis d'y parvenir en partie. En parallèle, J.P. CAMPAGNE m'a permis de poser les fondations de travaux de recherche sur une méthodologie de simulation. La rencontre avec L. CARRARO me permettra par la suite de travailler sur un vecteur important de transmission vers les entreprises, les formations sous statut salariés. On le détaillera par la suite, mais deux approches

fortement complémentaires peuvent être travaillées pour prendre en compte les aléas dans notre approche : soit on les considère comme étant là, et A. DOLGUI m'a aidé à les maîtriser et les intégrer dans des outils d'optimisation, soit on les fait disparaître pour ne pas avoir à les prendre en compte. Mes échanges avec le cabinet McKinsey me feront réfléchir sur l'excellence opérationnelle et le Lean comme outil pragmatique. A. DOLGUI me mettra également le pied à l'étrier pour découvrir la conduite du changement et le management, et ce travail sera poursuivi avec ses successeurs. À partir de toutes ces rencontres, et du cheminement intellectuel les accompagnant, une mise en œuvre itérative de plateformes a commencé, et la rencontre avec X. DELORME m'a permis de pouvoir définir des axes de travail permettant de travailler sur des solutions mettant en œuvre les 3 dimensions, jusqu'à la création de IT'mFactory, premier objet plateforme de Recherche & Développement abouti, qui n'aurait pas pu voir le jour sans la rencontre avec B. LEGER, actuel directeur de l'Institut FAYOL.

C'est avec une approche systémique (qui met à mal parfois la chronologie des choses) que je vous propose de retracer des vingt dernières années d'enseignant-chercheur, en y intégrant à chaque fois les différentes composantes et en décrivant plus en détail les objectifs, les actions, les livrables et les perspectives.

Le premier chapitre « une approche simulateur comme colonne vertébrale » propose une relecture de mes activités de recherche & développement autour de la création de méthodologies de modélisation/simulation, depuis l'analyse du problème jusqu'à la création des modèles de simulation et leur exploitation sous forme de plan d'expériences.

Le deuxième chapitre « variabilité/inflexibilité dans les modes de pilotage industriel » reprend mes activités de recherche & développement autour de la prise en compte des aléas (comment les faire disparaître ou mieux les gérer) dans les problèmes de gestion industrielle au sens large.

Le troisième chapitre « projet de recherche autour de IT'mFactory » propose une vision de mes futures activités de recherche & développement à travers des activités actuelles et futures supportées par une plateforme R&D (IT'mFactory), élément structurant et fédérateur en termes de formation, transfert et recherche partenariale.

---

## CHAPITRE 1 : UNE APPROCHE SIMULATOIRE COMME COLONNE VERTEBRALE

---



Que demande-t-on à un cadre (manager ou ingénieur) en contexte industriel ? Avant tout, face à une problématique donnée, de savoir analyser la situation, de savoir la faire partager à son équipe, et de « guider » cette dernière vers la mise en place d'une solution partagée la plus efficiente possible. Voilà résumées en quelques lignes plusieurs années de formation alliant « hard skill » et « soft skill ».

Le maître mot de tout cela est l'anticipation. Nous devons mettre en œuvre toutes nos connaissances, nos compétences acquises au service d'un projet nouveau, au contour souvent mal défini, et piloter ce projet avec un temps d'avance qui permettra de garantir un minimum de sérénité et de prise de recul face aux difficultés rencontrées.

Cette anticipation peut s'acquérir par l'expérience des années, mais elle passe pour moi également par un travail important de modélisation et de construction d'outils d'aide à la décision qui vont assurer le chemin à parcourir vers la solution du problème.

Dans le contexte industriel de ces vingt dernières années, on peut noter l'apparition du nouveau terme VUCA (Volatility, Uncertainty, Complexity and Ambiguity) pour caractériser le monde dans lequel nous évoluons et, a fortiori, le monde industriel. Il décrit avec justesse cet environnement industriel dans lequel nous nous situons aujourd'hui:

- **La volatilité** permet de décrire le caractère changeant ou évolutif des situations qui rend encore plus dynamique le processus de prise de décision. La recette classique qui marchait la veille doit être adaptée, améliorée pour prendre en compte cette évolution. Dit autrement, nous ne pouvons pas nous reposer sur nos lauriers, au risque de voir les clients, les marchés disparaître rapidement.
- **L'incertitude**, qui nous rappelle que nous ne vivons pas dans un monde déterministe, mais plutôt stochastique, où les aléas sont le propre de chacun des processus mis en œuvre. Ces aléas touchent tous les secteurs d'une entreprise, les achats, la production, les ventes, la qualité, ... et peuvent avoir des sources internes ou externes variées.
- **La complexité**, car chaque élément constitutif d'un processus industriel est fortement relié avec d'autres processus, rendant ainsi aujourd'hui difficile la vision globale. Nos systèmes industriels sont devenus illisibles à l'instar d'une pelote de laine laissée à la discrétion d'un chat : difficile de tricoter quelque chose avec ...
- **L'ambiguïté**, qui décrit le flou et/ou les paradoxes qui règnent dans nos prises de décision. Rien n'est blanc ou noir et les masses d'informations (bonnes ou mauvaises) à traiter rendent difficiles leur analyse.

Les entreprises sont donc directement confrontées, à plus ou moins grande échelle, à ces nouveaux challenges. Si l'on fait un focus sur leurs organisations industrielles, elles doivent absolument acquérir les méthodes et les outils leur permettant de modéliser et tester les nouveaux modes de pilotage afin de s'adapter le plus rapidement au contexte décrit.

Fort de mon expérience pendant les 3 années à travailler pour l'entreprise MICHELIN (et confortée par ces vingt dernières années), il m'apparaît comme une évidence que le concept de « simulation des flux » [BANKS 1999] répond totalement à ce nouveau challenge. Bien sûr, il ne constitue pas le seul élément de réponse que l'on peut apporter, mais passer à côté de cette famille de solutions me paraît être un manque important.

Qu'entend-t-on exactement par simulation des flux ?

Le concept de simulation est très vague : il consiste en général à disposer d'une « maquette » permettant de tester « in vitro » des idées afin de mieux les maîtriser, avant de les injecter, si les résultats sont prometteurs, dans le vrai monde. Il faudra bien-sûr dans ce cas ne pas oublier de modifier la maquette en fonction des choix faits. On voit se dégager la notion d'analyse de risques grâce à un processus anticipatif basé sur l'exploitation d'un modèle comportemental (la maquette).

Lorsque l'on parle de simulation dans une entreprise ou que l'on fait des recherches bibliographiques, ce concept est souvent associé au produit ou au process lui-même (simulation mécanique, écoulement, résistance des matériaux) et peu sur la composante organisationnelle des processus qui supporte leur fabrication. Il faut donc lui associer le terme « flux » pour accéder à cette famille d'outils d'aide à la décision, orientée organisation industrielle.

L'objectif est, toujours dans la philosophie générale de la simulation, de pouvoir représenter une maquette du système productif, en y intégrant l'ensemble des ressources nécessaires (machines, transports, Hommes) et l'ensemble des règles de pilotage décrivant les étapes de transformation des produits. Ces maquettes, par construction, permettront de prendre en compte la complexité inhérente des flux, la dynamique de prise de décision et la représentation des phénomènes aléatoires. Nous voyons un parallèle évident avec les éléments de description VUCA.

Faisons cependant attention car le concept de simulation de flux n'est pas autoportant. Il ne suffit pas de posséder les briques d'un jeu de construction pour en faire une jolie maison ou un château-fort ... il faut respecter un minimum de règles de construction (fondations, ...) et avoir un objectif en tête sinon le jeu tournera vite « en rond ». Il en est de même pour la simulation de flux, qui doit absolument être associée à une méthodologie de modélisation, et à la fourniture de concepts d'organisation industrielle à tester. Il faudra travailler autant sur le contenu que sur le contenant, au risque de disposer d'une belle voiture de course sans circuit, ou d'un circuit sans voiture de course ! Nous y reviendrons dans le chapitre 2 de ce mémoire.

Les travaux effectués pendant ma thèse m'avaient permis de prendre conscience de la puissance de ces concepts, mais également de leurs talons d'Achille, à savoir

- Le manque de généralité des briques permettant la construction de la colonne vertébrale du modèle et des briques représentant son fonctionnement,
- Les délais de construction d'un modèle de simulation, directement liés aux différentes phases de recueil d'information, d'analyse, de construction des modèles, de leur

validation/vérification, et de leur exploitation au sein de nombreux plans d'expériences. Ces délais sont souvent incompatibles avec la vie du projet, et provoquent parfois la construction de modèles très imparfaits...

- La non-visibilité de ces techniques dans le monde industriel, faisant que ces méthodes et outils restent le jouet de chercheurs ou de cabinets de consulting très pointus.

L'objectif a donc été pour moi de constituer des éléments de réponses à ces inhibiteurs de la simulation des flux en contexte industriel.

## **1. UNE APPROCHE MODULAIRE ET DISTRIBUEE**

---

L'évolution du contexte industriel pousse les entreprises à évoluer vers des systèmes de plus en plus décentralisés (entreprises virtuelles, groupement d'entreprises, ...). Les méthodes et les outils de simulation existants ne supportent pas de manière optimale ces nouveaux systèmes.

Nous nous situons dans le contexte de la simulation de systèmes industriels complexes et souhaitons investiguer le concept de décisions distribuées. Nous considérons plus particulièrement les problèmes de formalisation, de modularité, de centralisation/décentralisation et de mise en évidence des flux et sous-systèmes.

### **1. Autour des travaux de thèse de Stéphane GALLAND**

La première réponse a été la thèse de Stéphane GALLAND (1998 – 2001) que j'ai co-encadrée avec Philippe BEAUNE sous la direction de Jean-Pierre CAMPAGNE, intitulée « Approche multi-agents pour la conception et la construction d'un environnement de simulation en vue de l'évaluation des performances des ateliers multi-sites ».

Après avoir mis en évidence cette problématique de distribution, nous avons proposé une approche méthodologique adaptée aux systèmes industriels fortement distribués. Cette approche était basée sur les systèmes multi-agents et restait indépendante de toute plateforme ou outil informatique. Nous avons proposé un cycle de vie et une première définition des phases les plus importantes : spécification d'un modèle de simulation, conception d'un modèle multi-agents et implantation d'un modèle informatique. Les concepts que nous avons mis en œuvre (systèmes multi-agents [FERBER 1995], systémique, ...) nous ont permis de répondre aux différents problèmes posés par les systèmes de production complexes et distribués. Nous avons utilisé pour ce faire l'approche Voyelles (ou AEIO) : un système multi-agents (SMA) étant défini selon quatre aspects majeurs que sont les Agents, l'Environnement, les Interactions et l'Organisation.

Les systèmes multi-agents ont rendu réalisables les trois aspects de la distribution d'un système industriel :

- Distribution physique : l'autonomie et les capacités d'interaction des agents ont permis de réaliser à la fois la distribution au sein d'un réseau informatique et la répartition des différentes parties du système industriel en associant chaque agent à l'une d'elles ;
- Distribution informationnelle : les capacités cognitives et interactionnelles des agents ont permis de distribuer l'information ;
- Distribution décisionnelle : les mécanismes cognitifs composant les agents ont permis de mettre en place des processus de prise et de propagation des décisions.

De plus la modularité engendrée par l'utilisation des systèmes multi-agents nous a permis de répondre à un autre point crucial au niveau industriel : la réutilisation des connaissances et des outils déjà maîtrisés.

L'approche méthodologique MAMA'S proposée est basée sur le cycle de vie illustré par la figure 1.1 ci-dessous, et composée de cinq phases principales :

- L'Analyse permettant de rédiger un cahier des charges contenant la définition informelle du système de production à simuler, ainsi que les divers objectifs devant être atteints par le modèle informatique de simulation,
- La Spécification permettant aux concepteurs de construire un modèle abstrait de simulation i.e., un modèle représentant le système de production qui soit indépendant de toute plateforme SMA ou outil de simulation,
- La Conception transformant le modèle abstrait en un modèle de simulation orientée agents,
- L'Implantation consistant à choisir les outils de simulation et les plateformes SMA devant instancier le modèle produit par la phase de Conception,
- L'Exploitation, dernière étape majeure de notre cycle de vie, consistant en l'application de plans d'expériences sur le modèle informatique de simulation.

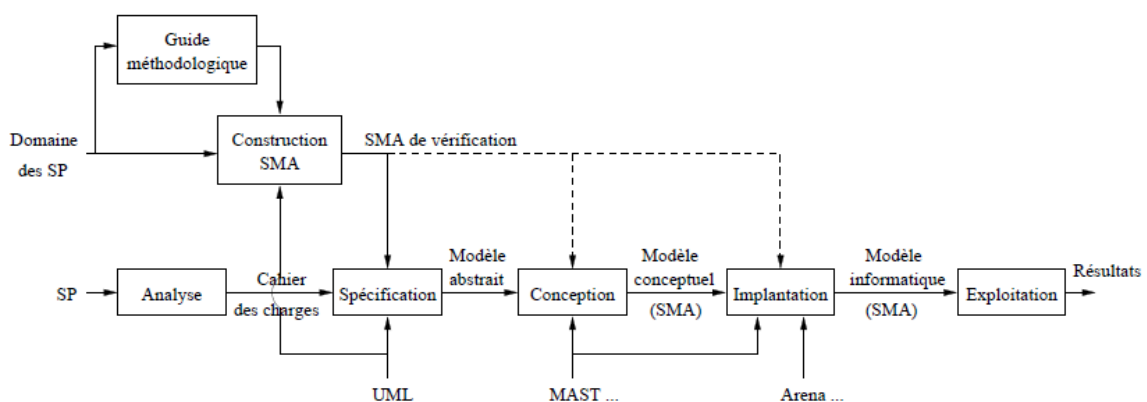


Figure 1.1 : Cycle de vie MAMA'S

Reprenons sommairement les 3 sous-systèmes [GOURGAND et al. 1992] qui composaient nos modèles et qui étaient représentés dans notre méthodologie comme des méta-modèles UML : sous-systèmes

physique, décisionnel et informationnel. Ceci nous permettra de présenter les fondamentaux de notre approche et de définir un certain nombre de concepts que nous réutiliserons par la suite.

Le sous-système physique est vu comme l'ensemble des infrastructures industrielles du système modélisé. Il est composé de :

- **File d'attente** : Les files d'attentes permettent de modéliser le concept de queues dans lesquelles les entités de flux peuvent attendre jusqu'à ce qu'elles puissent continuer leur trajet.
- **Serveur** : Afin de pouvoir représenter convenablement les flux physiques, nous introduisons la notion d'unités de traitement. Elle correspond aux éléments de modélisation bloquant le déplacement des entités durant une période de temps déterminée par une loi statistique comme par exemple les machines.
- **Ressource** : Nous introduisons les éléments de modélisation correspondant à des ressources. Nous considérons les ressources non typées et les ressources typées. Parmi ses dernières, nous incluons les moyens de transport : station, route, convoyeur et transporteur. Les stations sont des marqueurs permettant de placer des bornes nominatives au sein du flux physique. Les stations peuvent être utilisées pour modéliser les trajets des moyens de transport. Une route est une technique de transport où seul l'aspect temporel est pris en compte. Un convoyeur est un autre moyen de transport tenant compte à la fois des délais de transfert, mais aussi des données spatiales (longueur du trajet).
- **Gestion des flux** : Elle correspond à l'ensemble des éléments de modélisation réalisant un traitement particulier sur les entités. Le générateur d'entités permet de placer dans le modèle de simulation un point où les entités sont créées. À l'opposé, la destruction d'entités retire toutes les entités qui lui parviennent. Nous incluons dans ce groupe l'ensemble des éléments de modélisation permettant de représenter les flux : transitions, jonctions ou séparations des flux, ...
- **Entité** : Les entités sont les lots de matières premières, produits semi-finis ou finis transitant dans le flux physique.
- **Hiérarchisation** : Les modèles sont des canevas représentant un sous-système physique et contenant un ensemble d'éléments de modélisation. Ces derniers appartiennent aux autres catégories ou sont des sous-modèles i.e., un modèle dont les flux entrants et sortants sont utilisés par un modèle englobant.
- **Statistique** : Enfin les modèles de simulation permettent d'inclure des facteurs aléatoires par l'intermédiaire de lois de probabilité utilisés dans l'ensemble du modèle de simulation. De plus, ce groupe contient l'ensemble des éléments de modélisation permettant de récolter des informations statistiques sur le modèle de simulation.

Le sous-système décisionnel est l'ensemble des infrastructures organisationnelles du système industriel. Il permet de représenter une structure relationnelle entre des entités organisationnelles ou centre de prise de décisions. Les relations entre ces centres peuvent être d'ordre hiérarchique ou simplement relationnel.

Le sous-système décisionnel est représenté par la définition des différents types de centres de décisions : opérationnel (Operational Center), tactique (Tactical Center) et stratégique (Strategical Center). Nous voyons aussi apparaître la notion de « centre distant » (Remote Center) qui correspond à un centre de décision dont la définition exacte se trouve dans une autre partie du modèle de simulation distribué. Chaque centre peut être attaché à plusieurs modèles comportementaux (Behavioural Model). Ces derniers sont les descriptions des mécanismes de prise de décision. Par défaut, nous incluons dans notre méta-modèle deux types de modèles : les modèles réactifs permettent au centre de réagir immédiatement à une série de stimuli, et les modèles protocolaires correspondent à la définition de protocoles d'interactions avec d'autres centres e.g., appel d'offres, ... Ils permettent aussi de définir les contraintes sémantiques devant être respectées par le modèle de simulation.

Pour finir, le sous-système informationnel est la description de l'ensemble des informations nécessaires à la modélisation et la simulation d'un système industriel. Pour ce faire, nous incluons dans son méta-modèle UML les modèles des nomenclatures, des gammes et la liste des types de messages pouvant être échangés par les sous-systèmes (décision, entité, ...). Nous incluons dans ce sous-système la définition de l'ensemble des catégories de messages décisionnels échangés par les centres de prise de décisions.

Ce travail fondateur a été l'objet des publications suivantes dans des congrès, revues, et chapitres de livre :

#### COMMUNICATIONS DANS UN CONGRÈS

- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean-Pierre Campagne. Multi-Agent Methodological Approach for Distributed Simulation. 11th European Simulation Symposium, 1999, Erlangen, Germany. pp. 104-108, 1999.
- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Jean-Pierre Campagne. Methodological Approach for Distributed Simulation: General Concepts for MaMA-S. European Simulation Multiconference - Simulation and Modelling: Enablers for a better quality of life, 2000, Ghent, Belgium. pp. 77-82, 2000.
- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud. Multi-Agent Methodological Approach for Distributed Simulation: Life Cycle of MaMA-S. ASIM-Workshop 20/21.3 - Multiagentsystems and Individual-based simulation, 2000, Wuerzburg, Germany. pp. 83-93, 2000.
- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Jean-Pierre Campagne. Multi-agent architecture for distributed simulation: Teaching application for industrial management. European Simulation Multiconference - Simulation and Modelling: Enablers for a better quality of life, 2000, Ghent, Belgium. pp. 77-82, 2000.
- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Jean-Pierre Campagne. MAMA-S: phase de spécification d'un modèle de simulation pour un système industriel distribué. MOSIM '01 : conference francophone de modélisation et simulation No3, Apr 2001, Troyes, France. 2001.

- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Jean-Pierre Campagne. How to specify an simulation model of an industrial system in MaMA-S. 15th European Simulation Multiconferences - Modelling and Simulation (ESM 2001), Jun 2001, Prague, Czech Republic. pp. 296-305, 2001
- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean Pierre Campagne. Méthodologie pour la simulation de systèmes industriels complexes distribués au travers d'une étude de cas. 4ème Conférence Internationale de Génie Industriel, Jun 2001, Aix-Marseille-Ajaccio, France. 2001.
- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean-Pierre Campagne. A Study Case with a Methodological Approach for Complex and Distributed Industrial System Simulation. International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM 2001), 2001, Québec, Canada. 2001.

#### ARTICLES DANS DES REVUES

- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean-Pierre Campagne. MaMA-S : An introduction to a methodological approach for the simulation of distributed industrial systems. International Journal of Production Economics, Elsevier, 2003, 85 (1), pp. 11-31.

#### CHAPITRE D'OUVRAGE

- Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean Pierre Campagne. Simulation of Distributed Industrial Systems. Dolgui, Alexandre; Soldek, Jerzy; Zaikin, Oleg. Supply Chain optimisation : product/process design, facility location and flow control, Springer US, pp. 277-287, 2005, Applied Optimization, 978-0-387-23581-3.

## 2. Autour de la thèse de Vincent AUGUSTO

Les travaux de recherche de Vincent AUGUSTO entre 2005 et 2008 concernaient la modélisation, la simulation et le pilotage de flux en milieu hospitalier à l'aide d'UML et des réseaux de Petri.

Bien que ne faisant pas partie officiellement de son encadrement de thèse, ces travaux furent l'occasion de partager nos idées et réalisations autour des méthodologies de simulation, et d'apercevoir le degré de généralité de l'approche construite avec Stéphane GALLAND.

La modélisation et l'analyse des systèmes hospitaliers [MORENO 1999] [GOURGAND et al. 2008] sont traditionnellement réalisées en utilisant méthodes et outils issus du génie industriel. Cependant, les caractéristiques de ces systèmes sont difficiles à capturer avec les outils de modélisation et de simulation classiques. Notre objectif était de spécifier et de développer une plate-forme de modélisation et de simulation dédiée aux systèmes hospitaliers, appelée medPRO (medical Process-Resource-Organisation), accompagnée d'une méthodologie d'analyse adaptée au domaine médical. Cette plate-forme a été construite autour d'un cadre de modélisation et d'un guide méthodologique conçus pour un système hospitalier particulier. UML (Unified Modelling Language) a

été choisi pour la modélisation de ces systèmes. Plusieurs points de vue ont été proposés : Processus (vue centrée sur le patient), Ressource (comportement des ressources humaines et matérielles), et Organisation (relation entre les intervenants). Le comportement dynamique du modèle est spécifié grâce à une classe dédiée de réseaux de Petri, appelés réseaux de Petri de Santé : un algorithme de simulation à événements discrets a également été développé pour les réseaux de Petri.

Une large partie de ce travail a été dédiée au système de décision, qui est utilisé (i) pour appliquer des méthodes de planification et d'ordonnancement issues du génie industriel à des systèmes hospitaliers, et (ii) pour piloter le déroulement de la simulation en temps réel au travers d'une approche hybride hiérarchique/hétéroarchique. Trois études de cas ont également été réalisées pour montrer l'efficacité de la plateforme medPRO : l'unité neuro-vasculaire, la pharmacie et les blocs opératoires du CHU de Saint-Étienne. Plusieurs outils d'optimisation spécifiques ont été développés et inclus dans la plate-forme.

Cette collaboration fut l'objet de deux publications.

#### COMMUNICATIONS DANS DES CONGRES

- Vincent Augusto, Xie Xiaolan, Frédéric Grimaud. A Framework for the Modeling and Simulation of Health Care Systems. International Conference on Automation Science and Engineering, Sep 2007, Scottsdale, United States. IEEE, pp. 231 – 236 - 2007
- Vincent Augusto, Xie Xiaolan, Frédéric Grimaud. A simulation framework for health care systems. The 33rd International Conference on Operational Research Applied to Health Services (ORAHS'2007), Jul 2007, Saint Étienne, France - 2007

### 3. Autour des travaux de thèse de Mahdi EL ALAOU

Ces travaux sur les méthodologies de Modélisation & Simulation ont été repris en 2018 à travers le co-encadrement de la thèse de Mahdi EL ALAOU, dirigée par Xaver DELORME, « Design of manufacturing system within industry 4.0 : A simulation approach »

De nos jours, pour rester compétitive, une entreprise doit se confronter aux enjeux de l'Industrie du Futur. L'engagement de la Commission Européenne et la naissance de nombreuses institutions de recherche dévouées au développement de cette thématique, telles que le European Factories of the Future Research Association [EFFRA 2020] ou le consortium SmartFactoryKL [SMARTFACTORYKL 2017] en Allemagne, témoignent de l'importance croissante de cette transition. Cet avis est évidemment partagé par le monde académique [GILCHRIST 2016] et le monde industriel.

En France, outre le soutien du Ministère de l'Économie, des acteurs importants comme l'Alliance pour l'Industrie du Futur [AIF 2016] ou encore l'Institut Mines Telecom [IMT 2017] via entre autres l'Académie Franco-Allemande de l'Usine du Futur (IMT - TUM en Allemagne) dont elle fait partie, s'engagent à accompagner les entreprises dans leur démarche de transformation industrielle vers l'industrie 4.0 ou

industrie du futur. Le Plan d'action 2017 de l'Agence Nationale de la Recherche [ANR 2017] et des nombreux appels à projet montrent bien la forte implication de la recherche française.

Aujourd'hui, il paraît inévitable pour une entreprise de recourir aux nouvelles technologies du numérique ou de la fabrication, telles que Big Data, Simulation, Capteurs et Machines Intelligentes, ou encore l'Internet des Objets. De telles technologies ouvrent à des possibilités difficilement atteignables il y a seulement quelques années : ceci ne touche pas seulement à la dimension technique [NEGAHBAN et al. 2014], mais concerne également la définition de nouveaux business-model. De nouveaux systèmes de production industriels, profondément différents de ceux que l'on connaît aujourd'hui, se préfigurent et font surgir de nouveaux défis de recherche en termes d'ingénierie des systèmes, de modélisation et de questions sur l'interopérabilité des nouvelles technologies [DACLIN et al. 2016].

Comme le montre la figure 1.2 [BOER et al. 2007], l'industrie manufacturière vit aujourd'hui une transition majeure, du fait également de l'importance accrue du phénomène de « personnalisation de masse ».

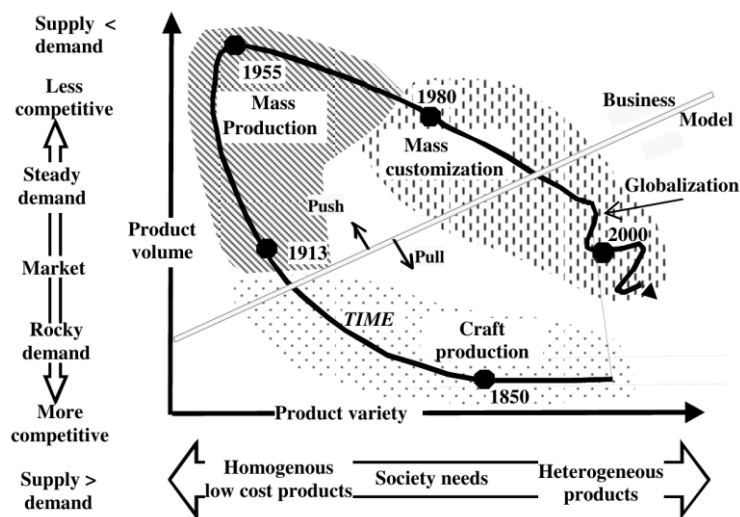


Figure 1.2 : [BOER et al. 2007]

La capacité à répondre dans des temps très courts à la demande croissante du marché pour des produits toujours plus personnalisés et de plus haute qualité devient désormais fondamentale. Cette transition accélère le cycle de vie produit et augmente l'incertitude sur les biens à concevoir. L'ensemble des répercussions des incertitudes de la demande sont à l'heure actuelle très difficiles à évaluer. En effet, de telles incertitudes, qui s'ajoutent aux effets classiques de la saisonnalité du marché, sont induites par de multiples causes, liées aux nouvelles exigences du marché mais aussi au milieu sociétal et économique environnant l'entreprise. Elles impactent le circuit logistique à tous les niveaux, de la réception de la demande client à la livraison des produits finis.

De ce fait, de nombreuses entreprises doivent désormais mener une démarche « Industrie du futur », basée sur une maîtrise de leur excellence opérationnelle et qui leur permettra d'augmenter l'efficacité de leurs sites de production par rapport aux plus fortes fluctuations auxquelles la demande client est aujourd'hui assujettie, au raccourcissement des cycles de vie des produits, et à la demande toujours plus importante d'informations du client pendant ce cycle.

L'approche globale de nos travaux actuels est d'adapter notre méthodologie de simulation à la nouvelle donne de l'industrie, l'industrie 4.0. Au-delà des définitions classiques de cette industrie 4.0, (système cyber-physique [BAGHERI et al. 2015] [UHLEMANN et ALL 2017 a]), attardons-nous sur les spécificités de cette nouvelle ère :

- La numérisation de l'usine : on constate que chaque process, voire chaque produit, devient un élément communicant dans l'usine, et que ceci génère un flux de données important et une augmentation des possibilités de réaction à ces données quasi exponentielles.
- Une nécessité de flexibilité et de personnalisation de masse : l'environnement VUCA décrit nous entraîne dans une spirale infernale en termes de réactivité, obligeant chaque industriel à revoir complètement sa manière de travailler et de structurer son outil de production au sens large. Depuis la définition des produits, de plus en plus personnalisés ou modulaires, jusqu'à la re-conception même des lignes de production pour être au service de cette modularité, le maître mot est l'adaptation quasi temps-réel aux stimuli du client. Ces nouvelles organisations doivent trouver un nouvel équilibre financier (business model) et un nouveau sens au travail à travers un management encore plus participatif donnant de la consistance à l'ensemble des actions menées : n'oublions jamais que l'élément le plus flexible de toutes les parties-prenantes de notre système production est et demeurera pour encore longtemps l'Homme.
- La création de nouveaux outils logistiques. Ils amènent également de la réactivité dans la supply chain [SIMCHI-LEVI et al. 2000] [MILLET et al. 2013] [MARQUES et al. 2012], et la notion d'approche globale de la performance y trouve tout son sens.
- La montée en puissance des outils de simulation : la puissance informatique, les quantités de données générées et stockées, ainsi que la complexité des flux entraînent bien-sûr les industriels à investir de manière significative sur des outils de simulation [RYAN et al. 2006]. Nous avons fait le constat en introduction de la difficulté d'appropriation de ces outils et méthodes et les limites constatées sur leur utilisation.

Il va donc de soi que cette nouvelle ère [KOREN 2010] est pour nous une aubaine et une motivation renouvelée pour porter la simulation de flux comme un des vecteurs forts de l'industrie 4.0 en allant jusqu'à la notion de « jumeau numérique » qui implique une connexion « temps réel » [ALC'ACER et al. 2019] entre le monde réel et sa représentation virtuelle (ou simulée), il nous faut prendre conscience de l'absolue nécessité de faire évoluer notre méthodologie pour être en phase avec cette évolution.

Le premier objet de nos recherches a été de replacer les limites des approches classiques et de s'intéresser au cadre et/ou à la réflexion définissant cette approche.

On constate que les méthodologies classiques (CIMOSA, GRAI [CHEN et al. 1996] [DOUMEINGTS et al. 1993], ...) utilisées en modélisation d'entreprises [VERNADAT 1998] [VERNADAT 2001] manquent de réactivité par rapport à définition de nouveaux objectifs (si ceux-ci n'ont pas été prévus à l'origine comme potentiellement mobilisables), et manquent également de verticalité (en ne proposant pas de déclinaison « technique » pour la construction de modèles de simulation).

De nombreux auteurs ont discuté de la nécessité d'élaborer une nouvelle norme pour la mise en œuvre des processus Industrie 4.0. Jusqu'à présent, deux références principales ont été proposées. Le premier est RAMI 4.0 (reference Architecture Model I 4.0) proposé par la communauté européenne, et le second est l'Internet industriel Architecture de référence (IIRA) proposée par la communauté américaine.

#### RAMI 4.0 (Reference Architecture Modeling Industry 4.0)

RAMI 4.0 [PISCHING et al. 2018] tente de répondre aux trois types d'intégration induits par l'industrie 4.0 à savoir vertical, horizontal et intégration de bout en bout.

- L'intégration verticale concerne la transformation d'une usine en usine intelligente en la dotant des nouvelles technologies et assurer la connectivité entre les mondes physique et virtuel.
- L'intégration horizontale traite de la connectivité du niveau produit à la connectivité des différentes usines intelligentes.
- L'intégration de bout en bout comprend toute la chaîne de valeur, du développement du produit ou du service à sa production et à sa maintenance en tenant compte des clients, des fournisseurs et de toutes les parties prenantes.

Ce cadre définit les fonctionnalités liées aux composants I4.0 telles que la traçabilité, les protocoles de communication, de sécurité, etc., il prend en compte trois dimensions: approche par strate, flux de valeur du cycle de vie et niveaux de hiérarchie pour faire face à des scénarii complexes de l'industrie 4.0.

RAMI 4.0 est considéré comme un processus d'ingénierie piloté par les modèles. Cela signifie que le niveau hiérarchique traite de l'aspect contrôle des systèmes. Il doit être décentralisé et intelligent afin de prendre en compte l'interdépendance entre les produits et le système de fabrication.

La principale difficulté de RAMI 4.0 est le manque d'informations pour la mise en œuvre.

#### IIRA (Industrial Internet Reference Architecture)

IIRA se concentre sur la façon dont les appareils intelligents et les données connexes sont traités et précise comment gérer les problèmes d'interopérabilité. Son principal avantage reste son architecture ouverte.

Le cadre de l'IIRA introduit quatre points de vue, à savoir le commerce, l'utilisation, la fonctionnalité et la mise en œuvre :

- Le point de vue « commerce » permet d'identifier la vision et les objectifs des composants d'un Système Internet des objets (IIoT).
- Le point de vue « utilisation » détermine l'utilisation attendue du système IIoT pour atteindre les objectifs fixés par le point de vue des entreprises.
- Le point de vue « implémentation » spécifie les technologies à utiliser pour implémenter les composants du système, pour effectuer leur communication et leurs procédures de cycle de vie.
- Le point de vue « fonctionnel » fournit les fonctions requises (domaines fonctionnels) pour assurer et pour développer un système générique IIoT

Concernant les nouvelles architectures proposées pour faire face au contexte de l'Industrie 4.0, nous identifions un inconvénient majeur lié au manque de l'aspect instanciation, ce qui est très important du point de vue méthode. Comme mentionné par (VERNADAT 2014), avoir un modèle unique valable pour toutes les entreprises est impossible en raison de la nature complexe de leurs différents aspects. Ainsi, inclure la dimension de la généricité est un des éléments clé pour évaluer la réutilisabilité de différents modèles et, à notre avis, devrait être ajoutée la prochaine version de ces architectures.

De plus, à notre connaissance, aucun travail (de recherche ou industriel, sur des cas réels) n'a utilisé ces architectures comme outils de référence de la phase de définition des besoins à la phase de mise en œuvre.

La création de notre méthodologie MEMO I4.0 permettra de répondre à ce cahier des charges, avec les quatre caractéristiques suivantes :

- **Agilité** : la mise en œuvre de la nouvelle configuration du système doit être effectuée rapidement. Pour y parvenir, nous recommandons le développement d'un modèle piloté par les données;
- **Modularité** : tous les modèles peuvent être assemblés et affichés en tant que « puzzle » pour construire le système souhaité. Utiliser le développement incrémental (Module par Module) et assurer le découplage des flux (matériel, information et contrôle) est essentiel pour conserver la modularité des modèles;
- **Interopérabilité** : les modèles développés ne doivent pas dépendre intrinsèquement de l'outil logiciel utilisé pour les mettre en œuvre. L'utilisation d'une couche de cartographie comme passerelle pourrait être une solution.
- **Robustesse** : des tests unitaires sont lancés pour valider chaque module séparément puis des tests d'intégration pour valider l'assemblage des différents modules. La robustesse de la modélisation est également liée à la facilité d'ajout de nouveaux KPI personnalisés.

Notre approche de méthodologie de simulation reste donc pertinente pour le développement des modèles de simulation, mais doit être adaptée à ce nouveau contexte. Nous proposons donc de travailler à l'ajout de la nouvelle vision de l'industrie 4.0 en mettant l'accent sur l'aspect connectivité entre les différents niveaux des composants du système, en intégrant la dimension « instanciation » aux nouvelles architectures pour travailler la généricité des modèles, et en définissant une approche

intégrée depuis la définition jusqu'à la phase de mise en œuvre afin de développer des systèmes industriels en phase avec l'Industrie 4.0.

L'approche MEMO I4.0 pour générer un modèle de simulation suit donc le principe de modularité et peut se résumer en deux étapes principales:

- Niveau stratégique / tactique: développement de modules de simulation utilisés ultérieurement au stade opérationnel;
- Niveau opérationnel: lorsque le gestionnaire formule un besoin spécifique à étudier, un modèle de simulation est nécessaire pour évaluer les performances du système. Sur la base des modules existants, de nouveaux modules nécessaires pour obtenir les modèles de simulation sont identifiés, puis instanciés avec des paramètres spécifiques à l'étude de cas. Si besoin, il est demandé la création d'un nouveau module (nouvelle machine, ...) ou la modification d'un module existant (ajout d'une nouvelle règle, ...)

La figure ci-dessous illustre l'organisation de cette approche structurée.

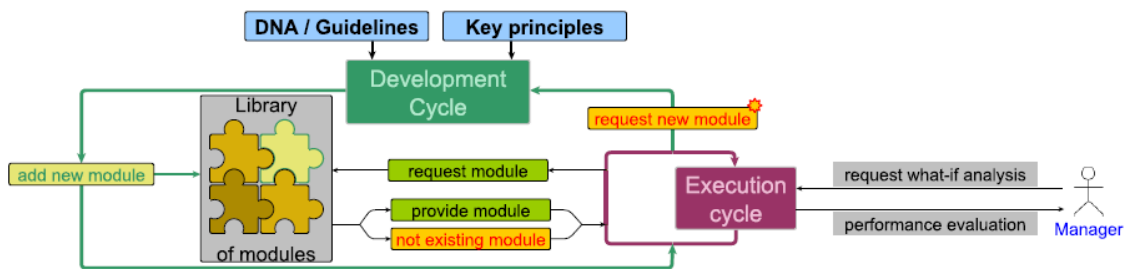


Figure 1.3 : Approche modulaire MEMO I4.0

Le cycle de vie d'un module s'articule autour de quatre phases: définition, conception, mise en œuvre et maintenance, en phase avec une démarche PDCA pour garantir le respect du principe de robustesse.

Au cours du développement de chaque module, des vues contribuent aux différentes phases de l'étape stratégique / tactique pour assurer la cohérence globale et aider également le modélisateur à effectuer le choix de modélisation le plus approprié i.e. le degré de généralité et le niveau d'échelle fixés. Voici très succinctement ces différentes vues avec les rôles associés :

Vue « fonctions » : elle permet de spécifier l'ADN et les lignes directrices du groupe industriel lors de la phase de définition, de décomposer le processus global en activités et détecter les flux entrants / sortants de chaque activité, afin de générer un diagramme SADT.

Vue « processus » : elle se concentre sur la définition des différents flux (physiques, informationnels, contrôle) lors de la phase de définition du besoin, avant de séparer ces flux avec la décomposition en activités en phase de conception. En plus des règles imposées par les « guidelines » du groupe

industriel, d'autres règles dérivées de la réalité du terrain sont capturées par l'équipe projet. Le format pseudo-code utilisé pour formaliser ces règles simplifie également les étapes ultérieures de codage pour produire le modèle de simulation (phase de mise en œuvre).

Vue « décisions » : elle vise à associer à chaque activité un ensemble de décisions en phase de définition. Pour faire cela, un outil de cartographie est utilisé pour esquisser la structure du processus de prise de décision en fonction de l'horizon temporel (stratégique, tactique, opérationnel) et des activités. Cette vue garantira à terme le couplage entre modèles d'optimisation et de simulation. En fonction du problème de décision à traiter, les choix de modélisation sont faits en phase de conception, tandis que le choix de l'approche de résolution est fait lors de la phase de mise en œuvre.

Vue « performances » : elle définit les KPI liés à chaque activité lors de la phase de définition. Une fois les KPI définis, leur structure est construite lors de la phase de conception et les données nécessaires à leur calcul sont précisées, ainsi que leur représentation (tableau de bord, tableaux, etc.) : cela permet de mieux vérifier le comportement du module lors de la phase d'implémentation.

Vue « information » : elle spécifie les informations associées à chaque activité (et les décisions associées) en phase de définition, c'est-à-dire les informations nécessaires pour représenter les flux d'entrée / sortie de chaque activité, construire le modèle de simulation et calculer les KPI correspondants.

Vue « données » : elle détermine les données brutes nécessaires pour extraire les informations utilisées dans la vue « information » à la phase de définition.

Vue « Ressources-Organisation » : elle permet de définir les ressources liées à chaque activité en phase de définition.

L'ensemble de ces travaux a fait l'objet des publications suivantes :

#### COMMUNICATION DANS DES CONGRÈS

- Mahdi El Alaoui El Abdellaoui, Frédéric Grimaud, Paolo Gianessi, Xavier Delorme. Integrated Decision Process to Design Manufacturing Systems towards Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine, Elsevier*, 2019, 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2019, 52 (13), pp.1373–1378. – **2019**
- Mahdi El Alaoui El Abdellaoui, Frédéric Grimaud, Paolo Gianessi, Xavier Delorme, Scalable, Reconfigurable simulation models in industry 4.0 – orientred enterprise modeling, Winter Simulation Conference WSC 2020, Dec 2020, – **2020**

## **2. UNE APPROCHE PRO-ACTIVE, LA SIMULATION « IN VITRO »**

---

Avec les travaux présentés autour de la construction d'une méthodologie de simulation modulaire et distribuée, nous avons répondu partiellement à l'objectif de guider la construction des modèles de simulation en garantissant une structure informatique solide et répondant aux problématiques de généricité.

Une autre approche, complémentaire, consiste à pouvoir construire en amont un environnement de simulation dit « in vitro », nous permettant de réfléchir à une représentation minimaliste au sens noble du terme des éléments constitutifs du modèle et nous permettant de conduire des plans d'expériences et d'en dégager des réponses sous forme d'abaques facilement intégrables dans le processus de décision industrielle.

### **1. Autour des travaux de thèse de Mohand ESSAID**

Le sujet d'étude des chaînes logistiques et de l'interaction de leurs différents maillons, nous a semblé particulièrement adapté pour travailler sur cette approche. Des travaux ont donc été réalisés lors du co-encadrement de la thèse de Mohand ESSAID (2005 - 2008), sous la direction de Patrick BURLAT, « Modélisation et simulation de la connectivité des flux logistiques dans les réseaux manufacturiers »

Notre démarche de recherche a alors consisté à évaluer la performance de chaînes logistiques constituées de différents profils d'entreprises, et ce, en utilisant une simulation en laboratoire « in vitro ». L'objectif de cette démarche était le benchmark de différents scénarii logistiques, la détection de configurations peu performantes et la mise en œuvre de mécanismes de coordination pour améliorer leur performance.

Nous avons délimité le champ d'étude de configuration de réseaux manufacturiers à un contexte « On Demand Production ». Dans ce contexte, il s'agissait d'évaluer le potentiel de différents profils d'entreprises à se connecter entre elles pour répondre à une demande d'un produit. Ces profils d'entreprises, ayant chacun leur niveau de performance local, sont appelés à constituer une chaîne pour répondre dans les meilleurs délais à la demande du marché.

À partir des résultats expérimentaux, il a été alors possible de constituer un guide méthodologique permettant une aide à la décision, sans repasser par des simulations.

#### Définition d'un modèle conceptuel :

À partir des éléments théoriques concernant les typologies de systèmes manufacturiers ainsi que les modèles de chaînes logistiques et les variables décisionnelles de leur pilotage, nous avons conçu un modèle générique d'entreprise.

Ce dernier sert de base pour configurer une chaîne logistique à trois niveaux (échelons). Un échelon de la chaîne est instancié selon : (i) Le type de processus de production (transfert, assemblage, différenciation) ; (ii) La stratégie de réponse à la demande (Make To Stock, Assemble To Order, Make

To Order) ; (iii) Le mode de gestion des flux (Replenishment Order Point, Kanban, Material Requirement Planning) ; (iv) Le niveau de capabilité du process (quatre niveaux A, B, C et D).

Pour ce qui est de la coordination des flux logistiques, elle se fait de façon décentralisée. Au niveau de chaque entreprise, des mécanismes de partage de prévisions, de contrats, etc. sont incorporés au modèle de la chaîne.

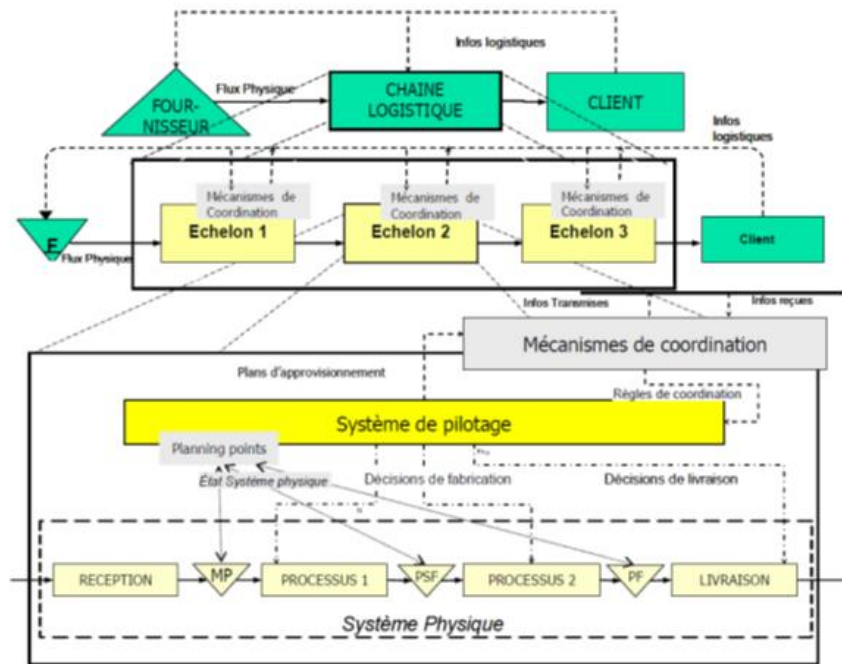


Figure 1.4 : Modèle générique de la supply chain

#### Construction d'un modèle de simulation :

À partir du modèle conceptuel, nous avons développé un modèle de simulation à événements discrets. Le modèle de simulation est associé à un outil de configuration qui permet de créer de façon automatisée divers scénarii de simulation de ces chaînes logistiques.

#### Expérimentation :

Nous avons délimité un périmètre expérimental, à savoir la simulation de chaînes logistiques fabriquant deux produits sur deux lignes de transfert. Nous avons testé deux environnements de production : une production sur stock sur la totalité de la chaîne et une production à la commande en amont de la chaîne. Le rechargement de stock à point de commande et un calcul MRP simplifié ont été utilisés comme modèles de pilotage des flux. Nous avons considéré quatre classes d'entreprises selon leur niveau de rendement global, et nous avons testé l'ensemble des combinaisons de ces profils d'entreprises.

Les résultats de simulation nous ont permis de réaliser un benchmark de différentes configurations logistiques et de déduire quelques mécanismes de comportement de ces chaînes. Nous avons notamment montré l'impact de l'homogénéité des échelons, de la position de l'entreprise la moins performante sur la performance globale de la chaîne, ainsi que les gains potentiels d'une stratégie de production à la commande.

Outre la soutenance de thèse, l'ensemble de ces travaux a fait l'objet des publications suivantes :

#### COMMUNICATIONS DANS UN CONGRÈS

- Mohand Essaid, Frédéric Grimaud, Patrick Burlat. Proposition d'un modèle d'intégration d'entreprises pour la simulation d'un réseau logistique. 7ème congrès international de génie industriel (CIGI'07), Jun 2007, Trois Rivières, Québec, Canada. 2007.
- Mohand Essaid, Frédéric Grimaud, Patrick Burlat. Supply chain performance measurement using simulation : an overall equipment effectiveness based analysis. 7ème conférence internationale de modélisation et simulation (MOSIM'08), Mar 2008, Paris, France. 2008.
- M. Essaid, Frédéric Grimaud, Patrick Burlat. Manufacturing network simulation: analysing material flow connectivity among dissimilar production systems. 15th International Working Seminar on Production Economics, Mar 2008, Innsbrück, Austria. 1, pp.165-176, 2008.

#### ARTICLES DANS DES REVUES

- Mohand Essaid, Frédéric Grimaud, Patrick Burlat. Manufacturing network simulation using a data-driven model. International Journal of Simulation and Process Modelling, Inderscience, 2011, Vol. 6 (No.3), pp. 228 - 237.

## 2. Autour des travaux de thèse d'Afafe ZHEROUNI

Ce travail de construction de modèle de simulation « in vitro » a été repris dans le cadre d'un travail sur la modélisation des réseaux de transport ferroviaire, avec comme objectif de construire un environnement de simulation dédié à la circulation des trains pour une intégration dans un couplage optimisation-simulation. On est donc ici dans le concept de simulateur « boîte noire ». Les objectifs et les verrous scientifiques ne sont pas tant la modularité et l'obtention rapide d'un modèle que la mise à disposition d'un simulateur dédié représentant la « substantifique moelle » du fonctionnement d'un réseau ferroviaire et l'interopérabilité de ce modèle avec le modèle d'optimisation.

Ce fut pour moi l'occasion de co-encadrer la thèse d'Afafe ZHEROUNI (2013 - 2016), sous la direction de Xavier DELORME [DELORME et al. 2009], « Etude et optimisation de la robustesse pour la planification intégrée du transport ferroviaire ».

Cette thèse avait donc plusieurs contributions :

1. Un modèle d'optimisation qui vise à proposer un plan de transport [TREFOND 2014] robuste des trois ressources critiques simultanément, selon des critères de robustesse pertinents.

L'intégration des ressources dans ce modèle permet de maîtriser les interactions des ressources, et les critères de robustesse définissent les caractéristiques qui définissent a priori un plan de transport robuste.

2. Un modèle de simulation à événements discrets pour évaluer la robustesse des plans de transport. Nous tentons dans cette phase de reproduire le comportement réel du système ferroviaire et l'utilisation des trois ressources critiques. Ce modèle a pour but de fournir des indicateurs qui quantifient l'impact des retards sur la circulation des trains et les interactions des ressources responsables de la propagation.

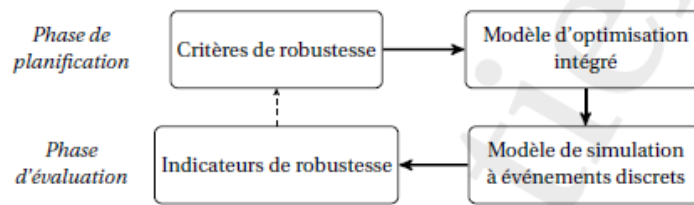


Figure 1.5 : schéma général de l'approche de recherche

J'ai plus particulièrement travaillé sur la réalisation du modèle de simulation à événements discrets « in vitro » afin de quantifier la robustesse d'un plan de transport soumis à des scénarii de retards primaires lors d'une couplage Simulation – Optimisation [HANI et AL 2008].

La modélisation de la circulation ferroviaire se base sur un ensemble de définitions que l'on répartit en trois points :

- La modélisation des trois ressources ferroviaires nécessaires à la circulation des trains : l'infrastructure, composée de gares et de voies, les engins et les agents de conduite.

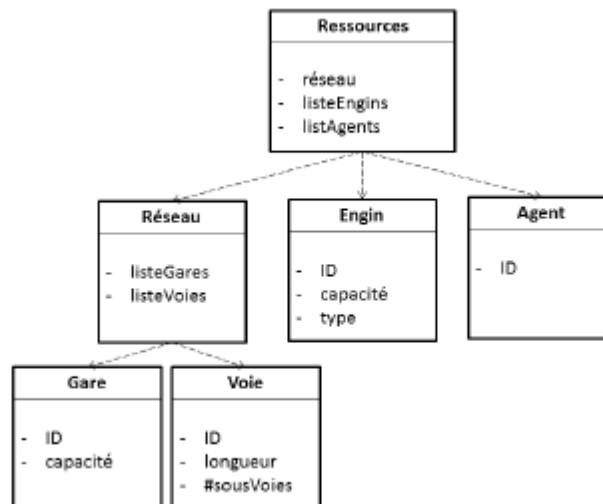


Figure 1.6 : modèle des données des ressources ferroviaires

- La modélisation de la circulation d'un train définie par l'utilisation dynamique des trois ressources ferroviaires tout au long du trajet.

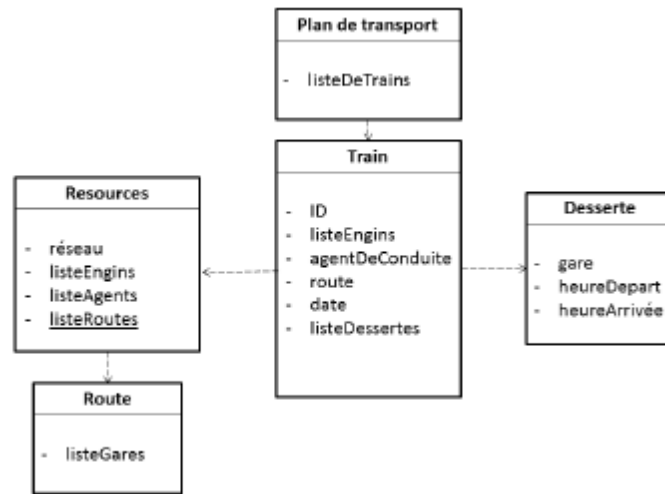


Figure 1.7 : modèle de données du plan de transport

- La modélisation de la circulation de plusieurs trains afin de gérer le partage des ressources entre les différents trains.

Un train est associé à au moins un agent de conduite et un engin du début à la fin de sa route. La production d'un train exige par conséquent la disponibilité des deux ressources avant l'heure de départ du train. De plus, l'engin doit être présent au quai de départ afin de permettre la montée des passagers à bord. Nous ne considérons pas une affectation nominative du quai aux gares d'arrêt, et vérifions que la capacité de la gare n'est pas saturée. Une fois l'ensemble des ressources disponibles, le train démarre sa route en alternant la circulation sur les voies et les arrêts en gares. Chaque section du réseau est définie par une capacité, et le processus en vérifie le respect à chaque étape du déplacement. La route du train est terminée une fois ce dernier entré dans sa gare finale. Les ressources sont alors à nouveau disponibles pour les trains suivants. Nous accordons aux ressources engins et agents de conduite un temps minimal entre deux trains successifs afin de permettre les manœuvres et les déplacements en gare.

Le processus de circulation d'un train ci-dessous contient deux blocs "Attente" où les entités (trains) attendent que les ressources occupées redeviennent disponibles. Ces blocs sont inutiles en situations non perturbées, dans la mesure où le plan de transport est élaboré sans conflit. Ils ont alors pour objectif de détecter et enregistrer la ressource indisponible partagée entre les trains. Ainsi le premier bloc détecte l'indisponibilité de l'agent de conduite, engin et d'un quai dans la gare de départ du train. Le second bloc permet d'enregistrer l'indisponibilité d'un quai dans les gares suivantes, ainsi que l'impossibilité de rentrer dans une section de voie. Néanmoins, les voies sont décomposées en un ensemble de sous-voies telles qu'un seul train puisse s'y trouver à un instant donné.

Le second bloc "Attente" permet de propager le retard uniquement lorsque la première sous-voie est indisponible.

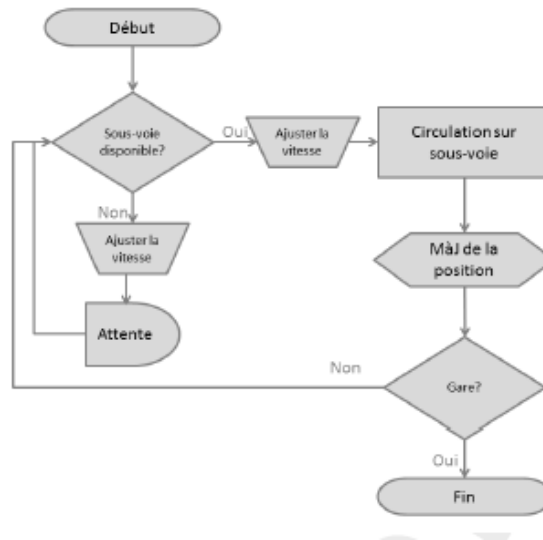


Figure 1.8 : processus de circulation d'un train

La modélisation du processus de circulation intègre également le parcours et le comportement du train entre deux gares successives (Figure 1.9). Ainsi, entre deux gares, un train est obligé de s'arrêter au feu de signalisation en raison de la présence d'un autre train le devantant sur la voie. Nous capturons cette propagation en pénalisant la durée de trajet du train à chaque fois que ce dernier doit ralentir pour s'arrêter ou accélérer pour redémarrer après un arrêt.

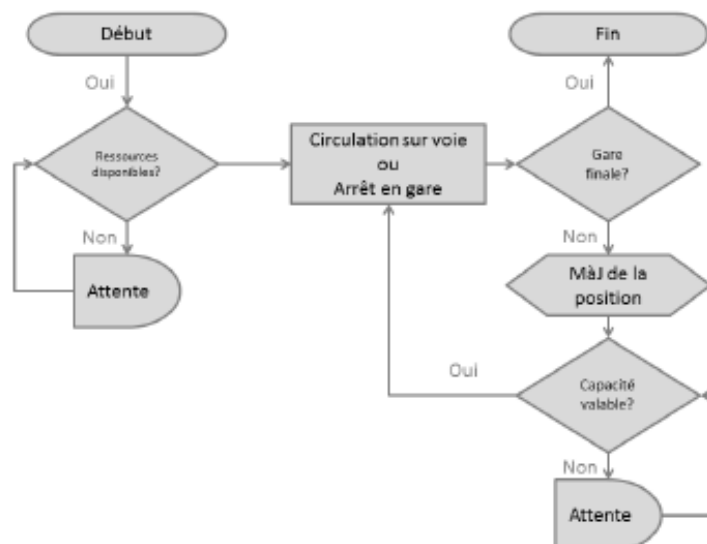


Figure 1.9 : processus de circulation d'un train entre deux gares successives

Le modèle obtenu permet alors de mesurer plusieurs familles d'indicateurs selon différentes métriques (Figure 1.10).

Famille	Indicateur	Définition
Quantification de la propagation	<i>%_secondary</i>	Pourcentage de trains touchés par un retard secondaire
	<i>total_secondary</i>	Total des retards secondaires (en minutes)
	<i>mean_secondary</i>	Moyenne des retards secondaires (en minutes)
	<i>max_secondary</i>	Plus grand retard secondaire
Source de la propagation	<i>busy_gare</i>	Propagation à cause d'une gare saturée
	<i>busy_voie</i>	Propagation à cause d'une section de voie
	<i>busy_engin</i>	Propagation à cause d'un engin
	<i>busy_agent</i>	Propagation à cause d'une section de voie

Figure 1.10 : indicateurs de retards et sources de propagation

L'innovation principale de ce modèle était de quantifier la propagation des retards par les trois ressources simultanément. Cela signifie que nous pouvions identifier les affectations de ressources les plus critiques dans un plan de transport en cas de retards. Nous mesurons de plus des indicateurs de robustesse usuellement utilisés par les opérateurs ferroviaires et les académiques afin d'évaluer la performance globale du système.

Ce travail fut l'occasion de valider la méthodologie globale, en passant de la définition de la structure du modèle, de sa portabilité dans un nouvel outil de simulation ANYLOGIC, et de la structuration des plans d'expériences.

Outre la soutenance de thèse, l'ensemble de ces travaux a fait l'objet des publications suivantes :

#### COMMUNICATIONS DANS UN CONGRES

- Afafe Zehrouni, Frédéric Grimaud, Olivier Guyon, Xavier Delorme, Dominique Feillet. Évaluation de la robustesse des plans de transport ferroviaires par simulation. ROADEF - 15ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision, Feb 2014, Bordeaux, France.
- Afafe Zehrouni, Frédéric Grimaud, Xavier Delorme, Dominique Feillet, Olivier Guyon. Evaluation par simulation de la robustesse des plans de transport ferroviaires. Conférence Internationale sur la Modélisation, l'Optimisation et la Simulation : de l'Economie Linéaire à l'Economie Circulaire (MOSIM 2014), Nov 2014, Nancy, France. 7p., 2014, Actes de la Conférence Internationale sur la Modélisation, l'Optimisation et la Simulation : de l'Economie Linéaire à l'Economie Circulaire (MOSIM 2014).
- Afafe Zehrouni, Xavier Delorme, Dominique Feillet, Frédéric Grimaud, Olivier Guyon. Toward a robust integrated optimization of timetable, rolling stock and crew, 6th International

Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo2015), Mar 2015, Narashino, Japan. 2015

- Afafe Zehrouni, Xavier Delorme, Frédéric Grimaud, Olivier Guyon. Planification robuste et intégrée des ressources ferroviaires, 16ème congrès de la société française de recherche opérationnelle et aide à la décision (ROADEF), Feb 2015, Marseille, France. 2015

---

Ces différents travaux, basés sur une approche simulateur, sont la base de mon travail de recherche. Ils ont permis de bâtir une méthodologie de modélisation en phase avec le besoin client et l'environnement actuel de l'industrie du futur. Que ce soit l'approche modulaire ou in vitro, les concepts et outils proposés vont dans le sens des verrous scientifiques définis en introduction : généricité et gestion des délais « projets ».

---

## CHAPITRE 2 : VARIABILITÉ/INFLEXIBILITÉ DANS LES MODES DE PILOTAGE INDUSTRIEL

---



La première partie de ce mémoire nous a permis de définir une approche d'aide à la décision en se basant sur la simulation des flux. Comme expliqué en introduction, l'intérêt d'un tel outil va de pair avec la réflexion sur les organisations industrielles à tester, et les objectifs finalement visés.

Dans cette deuxième partie, je souhaite faire un focus sur des travaux qui alimentent les deux points suivants :

- Comment améliorer la réponse d'un système productif soumis à une certaine variabilité ?
- Quels sont les « nouveaux » modèles de pilotage industriel qui permettent d'être plus en phase avec le contexte VUCA et comment les intégrer dans notre démarche simulatoire ?

## **1. VARIABILITÉ, LA FAIRE DISPARAÎTRE OU APPRENDRE À LA GÉRER ?**

---

La première question concerne donc la variabilité, ou la gestion des phénomènes aléatoires qui maltraitent nos systèmes. Deux approches complémentaires peuvent être mises en œuvre :

La première consiste à les éliminer. Pour ne pas avoir à les gérer, le plus simple est de les supprimer. Les méthodologies LEAN sont basées sur la destruction des inhibiteurs de la performance industrielle que sont les gaspillages, la variabilité et l'inflexibilité. J'ai conduit de nombreux projets, détaillés dans le curriculum vitae, qui avaient comme objectifs de travailler à la mise en œuvre de ces concepts d'amélioration continue sur des instances industrielles.

La deuxième approche consiste, quand on ne peut pas faire autrement, à en maîtriser le mieux possible les conséquences. Ce fut l'objet de travaux de recherche que je vais maintenant présenter, parmi lesquels on retrouvera des instanciations dans le domaine hospitalier ou micro-électronique.

### **1. Autour des travaux de thèse de Mehdi LAMIRI**

Un domaine dans lequel il est assez difficile de maîtriser les aléas concernent la gestion des blocs opératoires, avec la prise en compte des urgences et des temps d'intervention. Ces travaux furent pour moi la possibilité de retravailler dans le domaine de la santé, suite à la thèse de Vincent AUGUSTO.

Le co-encadrement de la thèse de Mehdi LAMIRI (2004-2007) sous la direction de Xiaolan XIE et Alexandre DOLGUI sur « Planification des blocs opératoires avec prise en compte des aléas » a été l'occasion de m'intéresser à une approche d'optimisation sous incertitude.

Le bloc opératoire constitue l'un des secteurs les plus coûteux et les plus importants dans un établissement hospitalier. Afin d'utiliser de manière efficace et rationnelle les ressources (humaines et matérielles) disponibles tout en assurant une bonne qualité de service vis-à-vis des patients, la planification du bloc opératoire est devenue l'une des premières préoccupations des établissements hospitaliers [MARCON et al. 2003]. Le problème consiste donc à déterminer pour un horizon de plusieurs jours, l'ensemble des interventions qui seront réalisées dans chaque salle opératoire. Le bloc opératoire est sujet à de nombreuses formes d'aléas qui concernent essentiellement la chirurgie d'urgence et les durées d'intervention. À ce titre, l'objectif de notre travail de recherche était de

développer des modèles et méthodes pour la planification des activités chirurgicales dans le bloc opératoire en tenant compte de la durée aléatoire des opérations et de la présence d'opérations urgentes qu'il faut intégrer dans le planning dès leur arrivée.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons proposé des modèles stochastiques qui

- Capturent les éléments essentiels à considérer lors de la planification des activités chirurgicales,
- Permettent de modéliser de manière explicite différentes formes d'aléas tels que les incertitudes relatives aux durées des interventions et à la chirurgie d'urgence,
- Peuvent être facilement étendus pour modéliser d'autres contraintes dues aux pratiques du terrain.

Nous avons aussi développé plusieurs approches et méthodes d'optimisation complètes et complémentaires pour la planification stochastique du bloc opératoire.

#### Formulation mathématique :

Nous considérons la planification des activités du bloc opératoire sur un horizon de planification discrétisé en  $H$  périodes, une période représente un jour. Deux types de patients sont considérés : les patients électifs qui sont connus et à programmer à l'avance sur les  $H$  jours, et les patients urgents, non programmables, qui arrivent de manière aléatoire et qui nécessitent une intervention chirurgicale le jour de leur arrivée.

Supposons qu'il y ait  $N$  patients électifs. Pour chaque patient électif  $i \in \{1, \dots, N\}$ , nous connaissons :

- $d_i$ , la durée opératoire : c'est la durée d'intervention du patient  $i$  ; elle inclut le temps de préparation, l'intervention chirurgicale, et la durée de nettoyage et de reconditionnement de la salle;
- $e_i$ , date au plus tôt de l'intervention  $i$  ; le patient ne peut pas être opéré avant cette date.

Pour chaque patient électif  $i$ , nous disposons d'un ensemble de coûts  $a_{it}$  ( $t \in \{1, \dots, H, H+1\}$ ).  $a_{it}$  représente le coût de réalisation de l'intervention du patient  $i$  le jour  $t$ . Une période fictive  $H+1$  est ajoutée à l'horizon de planification afin de regrouper les patients électifs qui ne seront pas programmés dans l'horizon actuel. Le coût  $a_{i(H+1)}$  représente alors le coût de la non-programmation de l'intervention  $i$ . Cet ensemble de coûts peut représenter des « vrais » coûts financiers, ainsi que des préférences.

L'affectation des patients à des salles opératoires spécifiques n'est pas prise en compte. Par ailleurs, nous supposons que les salles opératoires sont identiques, une intervention peut être réalisée dans toute salle opératoire, et seule la capacité globale de l'ensemble des salles opératoires est prise en compte.

Soit  $T_t$  la capacité régulière en nombre d'heures des salles opératoires pour le jour  $t$ . Si les interventions programmées et les interventions urgentes (non programmées) du jour  $t$  dépassent cette capacité, des coûts d'heures supplémentaires sont engendrés. Soit  $c_t$  le coût pour une heure supplémentaire au jour  $t$ .

Les patients urgents arrivent de manière aléatoire et doivent être pris en charge le jour de leur arrivée. Plus précisément, les interventions urgentes d'un jour donné doivent être réalisées en plus des interventions planifiées pour cette journée, quelle que soit la capacité régulière disponible. Soit  $W_t$  la durée totale de toutes les interventions urgentes réalisées le jour  $t$ . Cette durée est considérée comme une variable aléatoire. Nous supposons que sa distribution  $f(W_t)$  peut être estimée à partir des données historiques.

Le problème de planification consiste donc à déterminer les dates d'intervention des patients de manière à minimiser les coûts liés aux dates d'intervention des patients électifs ainsi les coûts moyens des heures supplémentaires associées à l'utilisation des salles opératoires.

Les variables de décision sont  $x_{it} \in \{0, 1\}$  avec  $x_{it} = 1$  si le patient  $i$  est affecté à la période(jour)  $t$ , et 0 sinon. Par convention  $x_{i(H+1)} = 1$  signifie que le patient  $i$  est affecté à la période fictive  $H+1$ , c'est-à-dire il ne sera pas opéré durant l'horizon actuel.

Le problème initial de planification (P) peut être formulé de la manière suivante :

$$(P) \quad J^* = \text{Minimiser } J(X) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=\theta_i}^{H+1} a_{it} x_{it} + \sum_{t=1}^H c_t O_t$$

sous contraintes:

$$O_t = E_{W_t} \left[ \left( W_t + \sum_{i=1}^N d_i x_{it} - T_t \right)^+ \right], \quad \forall t = 1, \dots, H$$

$$\sum_{t=\theta_i}^{H+1} x_{it} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, N$$

$$x_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i = 1, \dots, N, \quad \forall t = 1, \dots, H, H+1$$

Pour résoudre ce problème (P), nous avons proposé deux méthodes de résolution : une méthode « exacte » qui combine la simulation Monte Carlo et la programmation en nombres mixtes, et une méthode heuristique basée sur la relaxation lagrangienne.

Nous avons également proposé des extensions au modèle de planification pour permettre une affectation des patients aux salles opératoires, et la prise en compte d'une structure coût plus élaborée pour ces dernières. Une approche de résolution basée sur la génération de colonnes (en testant l'efficacité et les performances de différentes stratégies de génération de colonnes) a été formulée.

Une extension supplémentaire au modèle de planification (P) pour tenir compte non seulement des incertitudes dues à la chirurgie d'urgence mais aussi aux durées aléatoires des interventions électives a été étudiée et une nouvelle approche combinant la simulation Monte Carlo et la génération de colonnes a été testée. Afin d'améliorer les performances de cette approche, nous avons proposé des stratégies de génération de colonnes plus élaborées qui exploitent la structure du problème.

À partir d'expérimentations numériques, nous avons évalué les performances de ces différentes approches et nous avons montré leur efficacité. En particulier, nous avons montré que des gains considérables peuvent être réalisés en utilisant les modèles que nous avons proposés.

Outre la soutenance de thèse, l'ensemble de ces travaux a fait l'objet des publications suivantes :

#### COMMUNICATIONS DANS UN CONGRÈS

- M. Lamiri, Frédéric Grimaud, X. Xie. Optimization Methods for Surgery Planning Under Uncertain Demand for Emergency Surgery. A. Dolgui, G. Morel, C. Pereira. 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'06), May 2006, Saint-Étienne, France. Elsevier Science, 3, pp.633-638, ISBN : 978-0-08-044654-7, 2006

#### ARTICLES DANS DES REVUES

- Mehdi Lamiri, Xiaolan Xie, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, 2008, 185 (3), pp.1026-1037.
- Mehdi Lamiri, Frédéric Grimaud, Xiaolan Xie. Optimization methods for a stochastic surgery planning problem. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, 2009, 120 (2), pp. 400-410.

## 2. Autour des travaux de thèse de Ksenia SHEMELEVA

Le monde de la micro-électronique a pour caractéristique d'avoir des systèmes productifs avec de forts aléas, que ce soit sur les rebuts ou les pannes de matériels, sans parler de la complexité intrinsèque des flux.

Il était donc très intéressant de regarder la problématique de lotissement et de séquençement dans ce contexte et en y intégrant ces aléas. Le co-encadrement de la thèse de Ksenia SCHEMELEVA (2007/2010) sous la direction de Alexandre DOLGUI « Optimisation de la politique de lotissement et de séquençement pour une ligne de production soumise aux aléas » m'en a donné l'opportunité.

Les travaux de recherche effectués dans le cadre de cette thèse concernaient donc un problème de lotissement et de séquençement pour une ligne de production [DOLGUI et al. 2005]. Deux types d'aléas ont été pris en compte : le rendement aléatoire (à cause des rebuts) et le temps d'exécution aléatoire (à cause des pannes machines). Les temps de changement de série dépendant de la séquence des produits ont également été pris en compte. Ce problème est issu d'une fabrication automatisée (usine-

automate) de circuits imprimés et il a été posé lors de la conception du système de gestion de production d'un atelier. Le problème traité appartient à trois domaines de recherche:

- Lotissement optimal pour les systèmes de production imparfaits (ou lotissement sous incertitude);
- Ordonnancement et lotissement déterministe;
- Ordonnancement avec des temps ou (et) coûts de changement de série (setup).

#### Formulation mathématique :

Nous traitons un problème de lotissement et de séquençement pour  $n$  types de produits, le problème est donc de type multi-produits. La ligne de production est constituée de  $m$  machines, chacune capable de traiter une seule pièce à la fois. Chaque produit doit passer par toutes les machines. La séquence d'opérations (machines) est la même pour tous les types de produits. Le temps de transfert d'une pièce d'une machine  $q$  à la machine suivante  $q + 1$  est négligeable. Nous supposons qu'il n'est pas possible de soustraire une pièce de la production une fois qu'elle est engagée dans la ligne.

Considérant ces hypothèses, nous pouvons conclure que la ligne de production est un flow-shop sans attente et de permutation.

Dans un premier temps, nous avons étudié la problématique de séquençement et de dimensionnement de lots sur une machine. La machine était imparfaite sous deux aspects : elle peut d'une part produire des pièces défectueuses et d'autre part tomber en panne.

Soit  $n$  le nombre de types de produit à fabriquer. Pour chaque type de produit  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$  nous disposons des données suivantes :

- $d_i$  : la demande pour les pièces de bonne qualité,  $d_i > 0$  ;
- $c_i$  : le coût unitaire de non-réalisation d'une pièce,  $c_i > 0$  ;
- $t_i$  : le temps de fabrication d'une pièce,  $t_i > 0$  ;
- $s_{i,j}$  ( $s_{j,i}$ ) : le temps de changement de série entre un lot de produit  $i$  et  $j$  ( $j$  et  $i$ ),  $s_{i,j} \geq 0$ ,  $s_{j,i} \geq 0$  ;
- $s_{0,i}$  : le temps de préparation ( $s_{0,i} > 0$ ) lorsque la fabrication commence par une pièce de type  $i$  ;
- $f_i(x)$  : représente le nombre de pièces défectueuses pour un lot de produit  $i$ , si ce lot contient  $x$  composants, où  $f_i(0) = 0$ ; et  $f_i(x) \leq x$  pour chaque  $x = 1, 2, \dots$  ( $f_i$ ,  $i = 1; \dots; n$  sont des fonctions entières croissantes) ;
- $T(x_1; \dots; x_n)$  : la fonction représentant le temps total de réparation durant la période de production, où  $x_i$  correspond au nombre de pièces de type  $i$ .  $T()$  est une fonction réelle croissante et non négative.

Les fonctions  $f_i()$ ,  $i = 1; \dots; n$  et  $T()$  peuvent être obtenues par une analyse statistique des données réelles ou à l'aide de la simulation.

Nous avons étudié deux problèmes : P-Temps, où l'objectif est de minimiser le temps total de fabrication  $C_{max}$  (autrement dit minimiser le Makespan) et P-Coût, où l'objectif est de minimiser le coût total de non-réalisation de la demande sous la condition que la période de planification soit limitée à  $T_0$  (la borne supérieure fixe).

Pour les deux problèmes, les variables de décision sont les tailles de lots  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  et leur séquence  $\pi = (\pi_1, \pi_2; \dots, \pi_n)$ .

Nous formulons le problème P-Temps de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Minimiser } C(\pi, x) &= s_{0,\pi_1} + \sum_{j=2}^n s_{\pi_{j-1},\pi_j} + \sum_{i=1}^n t_i x_i + T(x) \\ \text{sous la contrainte } x_i - f_i(x_i) &\geq d_i, \quad x_i \in \mathbb{N}, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Nous formulons le problème P-Coût de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Minimiser } W(x) &:= \sum_{j=1}^n c_{\pi_j} \max\{0, d_{\pi_j} - (x_{\pi_j} - f_{\pi_j}(x_{\pi_j}))\} \\ \text{s. c. } Q(x) &:= s_{0,\pi_1} + \sum_{j=2}^n s_{\pi_{j-1},\pi_j} + \sum_{i=1}^n t_{\pi_i} x_{\pi_i} + T(x) \leq T_0 \quad x_i \in \mathbb{N}, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Dans un premier temps, nous avons utilisé l'approche qui consiste à remplacer les valeurs aléatoires par leurs caractéristiques déterministes (moyennes, centiles, etc.) et travailler sur des modèles déterministes. Pour ces modèles nous avons démontré que les décisions optimales de lotissement et de séquençement peuvent être prises séparément pour les deux problèmes.

Il a également été prouvé que ces deux problèmes sont NP-difficiles, si la quantité de pièces défectueuses est aléatoire.

Ensuite, nous avons considéré un cas particulier où le pourcentage des articles défectueux est donné pour chaque type de produits, et où le temps de réparation dépend directement du temps total de fabrication. Dans ce cas-là, uniquement le problème P-Coût reste NP-difficile. Nous avons proposé une méthode de résolution FPTAS pour ce cas particulier du problème P-Coût (un algorithme A est un FPTAS pour un problème d'optimisation P, si pour un ensemble I de données du problème et une valeur  $\epsilon > 0$  fixée, l'algorithme A peut trouver une solution S du problème P avec les paramètres I en un temps polynômial en fonction de  $1/\epsilon$  et de la taille de I)

Ensuite nous avons réalisé une étude du même type de problème, mais pour le cas où les variables aléatoires sont données par leurs lois de distribution et la ligne de production étudiée est un flow-shop de permutation, l'objectif étant de trouver la séquence et les tailles de lot maximisant la probabilité de satisfaire la demande pour tous les produits dans un horizon de planification donné. Nous avons proposé deux méthodes - une recherche locale et un algorithme génétique pour résoudre ce problème.

Parallèlement, nous avons développé un modèle de simulation permettant, à partir des données d'entrée de nos problèmes et d'une solution, d'obtenir par simulation de Monte-Carlo une approximation de la probabilité du niveau de service. Ce modèle nous a permis de mieux appréhender le comportement du système de production étudié.

Outre la soutenance de thèse, l'ensemble de ces travaux a fait l'objet des publications suivantes :

#### COMMUNICATIONS DANS UN CONGRÈS

- Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, Genrikh Levin, Ksenia Shchamialiova. A new problem of lot-sizing and sequencing under uncertainties. 23rd European Conference on Operational Research, Jul 2009, Bonn, Germany. 2009.
- Ksenia Shchamialiova, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. A Genetic Algorithm Based Approach for Multi-Product Lot-Sizing and Sequencing Problem Under Uncertainties. 42th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Aug 2009, Shanghai, China. 6p, 2009.
- Alexandre Dolgui, Ksenia Shchamialiova, Frédéric Grimaud. Solution methods for a multi-product lot-sizing and sequencing problem in a flow-shop. 12th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications (2010), Jul 2010, Villeneuve d'Ascq, France. Volume # 9 (Part# 1), 2010,
- Alexandre Dolgui, Kseniya Schemeleva, Frédéric Grimaud. A lot-sizing and scheduling problem under uncertainties. Workshop New Challenges in Scheduling Theory, Jul 2010, Lisbon, France. p 285, 2010.
- Ksenia Shchamialiova, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. Une approche génétique pour un problème de lotissement et de séquençement sous aléas. 8e Conférence Internationale Modélisation et Simulation (MOSIM'10), May 2010, Hammamet, Tunisia. 2010.
- Kseniya Schemeleva, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, Xavier Delorme, Mikhail Y. Kovalyov. Production Lot Sizes on a Single Imperfect Machine: FPTAS vs ILP Models. Borangiu, Theodor, Dolgui, Alexandre, Dumitrache, Ioan, Filip, Florin Gheorghe. 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM12), May 2012, Bucharest, Romania. Elsevier Science, Volume# 14, pp 590-595, 2012,
- Kseniya Schemeleva, Xavier Delorme, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. Experimental study of a decomposition approach for a sequencing and lot-sizing under uncertainties. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM'2013), Oct 2013, Rabat, Morocco. 10 p., 2013.
- Alexandre Dolgui, Kseniya Schemeleva, Xavier Delorme, Frédéric Grimaud. Lot-sizing and lot sequencing on a single imperfect machine with breakdowns and product rejects. 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS), Jul 2014, Barcelone, Spain. 2014.

#### ARTICLES DANS DES REVUES

- Kseniya Schemeleva, Xavier Delorme, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. Multi-product sequencing and lot-sizing under uncertainties: A memetic algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, International Federation of Automatic Control, 2012, Volume 25 (Issue 8), pp.Pages 1598-1610.
- Kseniya Schemeleva, Xavier Delorme, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, Mikhail Y. Kovalyov. Lot-sizing on a single imperfect machine: ILP models and FPTAS extensions. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, Volume 65 (Issue 4), pp. 561-569.

#### CHAPITRE D'OUVRAGE

- Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, Ksenia Shchamialiova. Supply Chain Management under Uncertainties: Lot-sizing and Scheduling Rules. Benyoucef, Lyes; Grabot, Bernard. *Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management*, Springer, 510 p, 2010, Springer Series in Advanced Manufacturing.

Ces travaux furent également l'occasion de participer à la publication de l'article revue suivant :

- Przemyslaw Korytkowski, Frédéric Grimaud, Alexandre Dolgui. Exponential smoothing for multi-product lot-sizing with heijunka and varying demand. *Management and Production Engineering Review*, 2014, Volume 5 (Number 2), pp. 20-26. – **2014**

## **2. ÉTUDE DE « NOUVEAUX » MODES DE PILOTAGE**

---

Au-delà de l'étude de la prise en compte de la variabilité dans des problèmes d'allocations de ressources et de lotissement, il nous a paru opportun, toujours avec comme optique de proposer des modèles organisationnels à tester dans nos modèles de simulation, de s'intéresser à des « nouveaux » modes de pilotage de la production.

On peut citer entre autres la production cyclique, le partage d'information (notamment le VMI) au sein de la supply chain, et le DemandDriven MRP qui permettent de répondre au moins partiellement aux objectifs VUCA. Les travaux présentés ci-dessous ont permis d'étudier ces mécanismes.

### **1. Autour des travaux de thèse de Mustapha CHEURFA**

La première méthode de pilotage « originale » étudiée a donc été le concept de production cyclique [MCCORMICK 1994], et plus précisément la prise en compte des compétences des ressources humaines dans l'ordonnancement de la production.

Avant de détailler les travaux effectués avec Mustapha CHEURFA, je souhaiterais reprendre l'historique des travaux auxquels j'ai participé et qui m'ont permis de définir la thématique de recherche de M. CHEURFA.

En effet, la participation aux travaux de recherche d'Amel MABED et Saliha HACID m'a permis de monter en compétences sur cette méthode de production.

Nous nous intéressons à une relation particulière entre clients et fournisseurs, celle fondée sur le principe de livraisons cycliques, selon lequel le fournisseur s'engage à livrer des quantités de produits à des intervalles de temps fixes et de façon répétitive. L'intérêt de ce mode de livraison est qu'il permet aux donneurs d'ordres une gestion extrêmement simple des approvisionnements et facilite l'organisation des activités.

Comme réponse à ce type de livraisons et afin de synchroniser leurs flux de production à ceux de livraisons, les entreprises adoptent la production cyclique. L'avantage de cette dernière est qu'elle permet entre autres de réduire les coûts engendrés par la fabrication, et de simplifier l'organisation du travail.

Notre travail a donc consisté en l'évaluation et la mise en œuvre d'un plan de production cyclique, pour un atelier de type Flow Shop pur fabriquant plusieurs produits, lorsque les appels de livraisons sont cycliques. Nous avons proposé une nouvelle méthode déterminant un plan de production cyclique minimisant des coûts de lancement, coûts de stockage et des coûts de fabrication.

Outre ma participation en tant que membre du jury de thèse, ces travaux ont fait l'objet des communications suivantes :

- Jean-Pierre Campagne, Frédéric Grimaud, Amel Mabed. Pilotage de systèmes de production cycliques : Proposition d'une infrastructure de gestion. GI 2001 : 4ème congrès international de génie industriel, Juin 2001, Marseille. Pp. 1083-1094 - **2001**
- Jean-Pierre CAMPAGNE, Frédéric GRIMAUD, Saliha HACID, Production cyclique : Application et évaluation par simulation chez un équipementier automobile, Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'01, Avril 2001, Troyes - **2001**

En poursuite de ces activités sur la production cyclique, le travail de co-encadrement de la thèse de Mustapha CHEURFA (2002/2005) sous la direction de Jean-Pierre CAMPAGNE, « Gestion des ressources humaines en production cyclique » m'a permis :

- De travailler à la découverte d'une méthode originale
- D'y intégrer le problème de prise en compte des contraintes liées aux ressources humaines, en termes d'affectation des opérateurs aux machines, dans les problèmes d'ordonnancement d'atelier. Ce problème intégrant l'affectation des opérateurs aux machines consiste à déterminer l'état de l'atelier au cours du temps, et à considérer le problème d'ordonnancement d'atelier dans sa globalité en prenant en compte l'influence de l'affectation des ressources humaines sur les activités de production. Ceci impose en plus de la gestion de la séquence des travaux, la gestion des affectations des hommes aux postes de travail.

Nous avons donc considéré le cas où les productivités des machines dépendent de l'affectation des opérateurs. Nous avons supposé que le nombre d'opérateurs était inférieur au nombre de machines, un opérateur pouvant superviser simultanément plusieurs machines, et que la supervision simultanée de plusieurs machines par un opérateur diminue la productivité de ces dernières.

L'originalité de nos travaux de recherche était liée au fait que les durées opératoires des travaux sont variables dans le temps et sont fonction de l'évolution des affectations des opérateurs aux machines dans le temps.

Nos travaux de recherche ont été partitionnés en deux grandes parties.

La première partie a porté sur le problème de modélisation de l'affectation des opérateurs aux machines. Elle a consisté en la proposition d'un cadre théorique pour l'intégration des contraintes liées à la prise en compte des ressources humaines, en termes d'affectation des opérateurs aux machines, dans la modélisation des problèmes d'ordonnancement d'atelier. Une définition d'un problème d'ordonnancement d'atelier impliquant l'aspect « ressources humaines » a été proposée.

La seconde partie a porté sur une application de la modélisation proposée dans la première partie pour le cas d'une production cyclique. Plus précisément, nous avons étudié le problème d'existence d'une affectation des opérateurs réalisant un ordonnancement cyclique pour un atelier de type Flow Shop. Nous avons supposé qu'un ordonnancement cyclique, défini par une durée de cycle et d'un ensemble de travaux à réaliser durant cette durée, est donné pour des productivités nominales des machines et sans aucune prise en compte des ressources humaines. Par conséquent, et dans le cas où le nombre d'opérateurs est inférieur au nombre de machines et que l'affectation des opérateurs conditionnent les productivités des machines, l'introduction et la considération des ressources humaines pour la réalisation de l'ordonnancement cyclique pourrait allonger la durée d'exécution des travaux et remettre en cause la durée de cycle. Nous avons étudié ce problème d'existence d'une affectation des opérateurs réalisable pour Flow Shop Cyclique pour trois modes de réaffectations des opérateurs : calendaire, sur événement de fin de tâche et libre. Nous avons présenté une formulation mathématique du problème pour ces trois modes de réaffectation des opérateurs, démontré que ce problème est NP-complet pour les deux modes calendaire et sur événement, et qu'une restriction du problème de mode de réaffectation libre est NP-complet. Nous avons également proposé, pour ces trois modes, un modèle mathématique linéaire en nombre entier. Une approche de résolution basée sur le principe de la programmation dynamique a été proposée pour les deux modes réaffectation calendaire et sur événement.

Outre la soutenance de thèse, l'ensemble de ces travaux a fait l'objet des publications suivantes :

#### COMMUNICATIONS DANS UN CONGRÈS

- Mustapha Cheurfa, Pierre Baptiste, Jean Pierre Campagne, Frédéric Grimaud. Prise en compte des Ressources Humaines en Ordonnancement : Application à l'Ordonnancement

Cyclique. Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2004), Nov 2004, Douz, Tunisia. 2004.

- Mustapha Cheurfa, Pierre Baptiste, Jean Pierre Campagne, Frédéric Grimaud. Affectation du Personnel en Ordonnancement Cyclique : Cas de Réaffectation en Fin de Tâche. Cinquième Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'04, Sep 2004, Nantes, France. 2004.
- M. Cheurfa, P. Baptiste, Jean Pierre Campagne, Frédéric Grimaud. Operator's Assignment problem in Workshop Scheduling. 12th IFAC Symposium on Information Control problems in Manufacturing (INCOM'06), May 2006, ST ÉTIENNE, France. Vol 3, pp.107-112, .2006.

#### ARTICLES DANS DES REVUES

- M. Cheurfa, Philippe Baptiste, Jean Pierre Campagne, Frédéric Grimaud. Prise en compte des contraintes liées aux ressources humaines en production : application à la production cyclique. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Hermès, 2006, Vol 40 (n°6), pp629-663.

## 2. Autour des travaux de thèse de Sonia ROUIBI

En se basant sur le travail réalisé avec Mohand ESSAID sur la définition d'un environnement de simulation « in vitro » pour l'étude des supply chain, nous avons construit une étude sur l'impact du partage d'informations et du Vendor Managed Inventory [MARQUES et al. 2010], sur la performance des chaînes logistiques.

Ce travail, au travers du co-encadrement de la thèse de Sonia ROUIBI (2008/2012), sous la direction de Patrick BURLAT, « Impacts du partage d'informations et du Vendor Managed Inventory sur la performance des chaînes logistiques », a permis de s'intéresser à ces techniques de collaboration entre entreprises au sein d'une supply chain.

En effet, le développement des technologies de l'information et de la communication que connaît notre siècle a grandement facilité les pratiques d'échanges d'informations au sein des chaînes logistiques. Ces pratiques ont pu ainsi évoluer vers de nouvelles formes de collaborations entre entreprises, telles que le Partage d'Informations (PI) et le Vendor Managed Inventory (VMI).

La contribution de cette thèse a été l'analyse des impacts de ces mécanismes sur des chaînes logistiques où tous les maillons sont des entreprises de production dont les efficacités peuvent être différentes. Pour ce faire, plusieurs scénarii ont été étudiés sur des chaînes logistiques constituées de trois échelons, chaque échelon pouvant appartenir à quatre classes d'efficacité. Ces chaînes pouvaient répondre à deux types de demande du marché final ; une demande stable ou une demande variable. De plus, plusieurs mécanismes de coordination ont été étudiés : les mécanismes de gestion standard, de partage d'informations entre deux échelons, de partage d'informations entre trois échelons, de VMI entre deux échelons, puis de VMI étendu aux trois échelons.

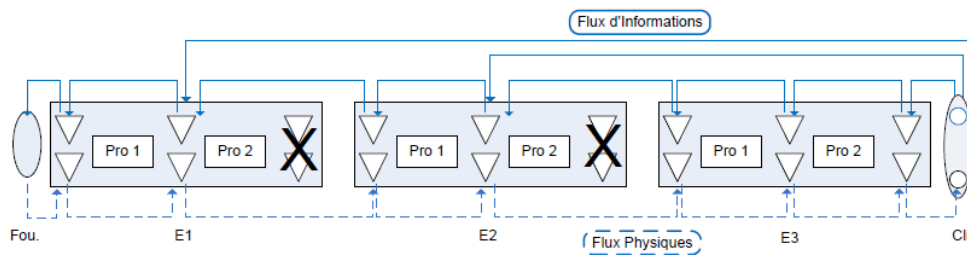


Figure 2.1 : Chaîne logistique avec VMI étendu

Nous avons repris pour ce faire la classification des efficacités des entreprises réalisée dans les travaux de thèse de M. ESSAID. Cette classification répartissait les entreprises en quatre classes d'efficacité (A, B, C, D).

L'analyse de nos résultats a montré que les 64 configurations de chaînes (4 classes pour chacun des 3 échelons) peuvent être groupées en trois catégories de performance : les chaînes logistiques de haute performance (catégorie 1), les chaînes logistiques de performance médiane (catégorie 2) et les chaînes logistiques de performance très dégradée (catégorie 3).

L'analyse des résultats de simulation a permis l'identification de collaborations intéressantes et d'autres à proscrire. En effet, nous avons trouvé que la classe d'efficacité de l'entreprise ainsi que sa position dans la chaîne logistique jouent un rôle important dans la performance globale de la chaîne. Ainsi, les entreprises en amont direct du client final doivent appartenir à une haute classe d'efficacité (A ou B) afin que la chaîne logistique soit performante. Par contre, placer deux entreprises de faible classe d'efficacité (C ou D) en amont du client final aboutit à la détérioration du profit de la chaîne logistique.

Les mécanismes de partage d'informations ont eu pour conséquence d'augmenter les stocks de l'entreprise en amont direct du client final. Cette augmentation a permis d'améliorer le niveau de service de ce dernier. La mise en place des mécanismes de coordination de type VMI ou VMI Étendu a permis aux chaînes logistiques de réduire leurs coûts et leurs stocks totaux. L'échelon le plus avantageux par le VMI, en termes de profit, varie en fonction de la catégorie de la chaîne logistique. Pour les chaînes logistiques de catégorie de performance la plus élevée, c'est le client VMI qui a le plus bénéficié du VMI à travers une meilleure satisfaction du client final. Par contre, le fournisseur VMI a subi une réduction des profits due à l'augmentation de la fréquence des livraisons. Pour les autres catégories de performance de chaînes logistiques, les deux parties engagées dans le VMI ont bénéficié de l'amélioration de leurs profits avec une augmentation plus importante pour le fournisseur VMI. Les avantages du VMI et du VMI Étendu sont plus ressentis dans les chaînes logistiques de moindre performance.

Outre la soutenance de thèse, l'ensemble de ces travaux a fait l'objet de la publication suivante :

## COMMUNICATIONS DANS UN CONGRES

- Sonia Rouibi, Patrick Burlat, Frédéric Grimaud. Réduction des stocks d'une chaîne logistique via différents mécanismes de coordination. 12e congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2011), Mar 2011, Saint Étienne, France. pp. 5-6, 2011.

### 3. Autour des travaux de thèse de Stéphanie BAYARD

Dans de nombreux secteurs, les entreprises recourent, le plus souvent, pour leur pilotage de production à un couplage entre le MRP pour la planification long terme et les philosophies Lean Manufacturing pour le pilotage d'atelier. Mais ces techniques de pilotage nécessitent une faible variabilité du système ce qui est rarement le cas dans la réalité, même dans des secteurs pour lesquels on dispose pourtant de prévisions sur plusieurs années, comme c'est le cas dans l'aéronautique. Face à cette variabilité, interne et externe, les entreprises multiplient donc les sécurités sur les délais et les stocks ce qui conduit à une surévaluation des stocks et donc à une pénalisation de la performance des entreprises.

Dans un contexte fortement concurrentiel, ce type de décisions génère une contrainte financière forte de par l'augmentation du besoin en fonds de roulement et une perte de performance globale par l'immobilisation financière engendrée. La problématique de maîtrise des stocks revient donc en force. Or les théories et modèles habituels n'apportent pas de réponse concrète.

Dans ce cadre, une nouvelle théorie « Demand Driven Adaptative Entreprise » [PTAK et al. 2018a] [PTAK et al. 2018b] introduit entre autres la notion de stock de découplage dont la position et le dimensionnement permettent de réduire l'impact de la variabilité sur la chaîne logistique tout en préservant les performances industrielles. Cette théorie est aussi connue sous le nom « Demand Driven MRP » ou DDMRP). Cette théorie est intéressante et pourrait apporter des réponses aux entreprises concernées par cette problématique comme par exemple les acteurs de la Supply Chain Aéronautique. Cela étant, les publications scientifiques [MICLO 2016] [MCCULLEN et al. 2015] [SHOFA et al. 2017] sur le sujet n'apportent que peu de réponses concernant les paramètres de dimensionnement et de positionnement. Ce nouveau courant permet de s'interroger sur les systèmes de pilotage de production et leur adaptation à un contexte de forte variabilité et d'environnement incertain dans le cadre de processus complexes.

Le co-encadrement de la thèse de Stéphanie BAYARD (2018-), sous la direction de Xavier DELORME, sur « Positionnement et dimensionnement des stocks de découplage pour les systèmes de pilotage de production confrontés à une demande variable et des nomenclatures complexes : enjeux industriels et économiques » nous a permis d'investiguer une nouvelle méthode prometteuse de pilotage industriel.

Les objectifs de ce projet de recherche sont d'apporter des réponses quant à :

- La typologie des problématiques liées aux entreprises évoluant dans un contexte de demande variable et de nomenclatures complexes,
- La proposition d'une démarche de définition des points de découplage, des paramètres de gestion associés et des indicateurs industriels et économiques [SMITH 2014], en se basant sur des cas d'études industriels représentatifs,
- La création d'un modèle comportemental permettant une validation dynamique de ces propositions en s'appuyant sur la simulation à événements discrets [TANNOCK et al. 2007],
- La généralisation de la démarche dans le cadre d'une méthodologie s'appliquant de la logistique interne à la logistique externe, et proposant une intégration des différents outils dans un standard de management de la performance globale.

#### COMMUNICATIONS DANS UN CONGRÈS

- Stéphanie Bayard, Xavier Delorme, Frédéric Grimaud. DMRP vs MRP2 : impacts of choice on financial and customer performance facing different demand profiles. *Twenty-first International Working Seminar on Production Economics*, Universität Innsbruck, Feb 2020, Innsbruck, Austria – **2020**
- Stéphanie Bayard, Frederic Grimaud, Xavier Delorme, Discrete Event Simulation framework for Demand Driven MRP performances evaluation, ESM'2020, October 21-23, 2020, LAAS, Toulouse, – **2020**
- Stéphanie Bayard, Frédéric Grimaud. ENJEUX FINANCIERS DE DDMRP : UNE APPROCHE SIMULATOIRE. 12e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation–MOSIM'18, Jun 2018, TOULOUSE, France – **2018**

#### PARTICIPATION À DES WORKSHOP

- Stéphanie Bayard, Frédéric Grimaud, Xavier Delorme. Présentation ESCAPADD. *Forum SPACE*, Dec 2019, Toulouse, France

---

Ce chapitre 2 du mémoire s'intéressait aux nouveaux modes de pilotage qui permettent de prendre en compte à court terme ou d'un point de vue stratégique la variabilité intrinsèque du système que l'on modélise. Avec le chapitre 1, elle constitue l'apport majeur de ma contribution recherche, si l'on exclut le travail sur les plateformes décrit dans le chapitre 3.

À travers les encadrements de thèses, les participations aux programmes de recherche, les actions de formations et les contrats industriels, j'espère avoir fourni un ensemble de faisceaux concordant sur

mes capacités à mener des actions de Recherche et Développement, et plus précisément dans le cadre de l'amélioration des performances des entreprises, en proposant des modèles et outils originaux et adaptés à l'environnement actuel, à savoir l'industrie 4.0.



---

## CHAPITRE 3 : PROJET DE RECHERCHE AUTOUR DE IT'mFACTORY

---



Fort de mon expérience avec les plateformes INEXO et PerformanceLab, la plateforme IT'mFactory que je porte, accompagné d'une équipe de 15 enseignants-chercheurs environ, se veut être une référence pour le soutien aux entreprises dans leur évolution vers l'usine numérique à travers des projets de Recherche & Développement.

Cette plateforme a été initiée en 2018 grâce à un co-financement UIMM Loire et Mines Saint-Étienne, et constitue le socle de mon projet de recherche. Je vais donc dans un premier temps détailler le contenu de cette plateforme à travers ses finalités et son offre, puis je présenterai les projets de Recherche & Développement actuellement en phase de démarrage, ainsi que les perspectives à moyen et long termes.

## **1. IT'mFactory : UNE PLATEFORME R&D DEDIEE À L'INDUSTRIE DU FUTUR**

---

### **1. Finalités de la plateforme de R&D IT'mFactory**

Elle fonde ses objectifs et finalités sur les besoins des entreprises pour répondre à leurs enjeux de fonctionnement. La notion même d'usine numérique pose de nombreuses questions, auxquelles il va nous falloir répondre :

- Revalorisation du rôle de l'homme (expertise de geste, de diagnostic, de perception, etc.), avec la machine (puissance, vitesse, robustesse, fiabilité, répétabilité, etc.), évolution / maintien des postes dans la transition technologique/numérique
- Revalorisation de l'image sociétale des métiers de l'industrie et de la production et attractivité des postes de l'usine.
- Réorganisation des métiers le long de la chaîne de production (conception, production, etc...), réorganisation des espaces internes et des ateliers en lien fort avec le socle numérique de l'usine.
- Réduction de la pénibilité du travail, limitation des TMS et maladies liées au poste (physique, cognitif) avec une amélioration de la sécurité de l'opérateur.
- Nécessité d'accompagnement des opérateurs à la diffusion technologique / numérique au sein de leur environnement de travail par une formation adaptée.
- Dialogue renforcé entre technologues et prescripteurs sociaux (ergonomes, ...) pour faciliter l'appropriation des nouvelles technologies par les opérateurs et techniciens.

Dans ce cadre, nous allons présenter le projet IT'mFactory sous l'angle de son intérêt et de ses objectifs pour répondre aux besoins et enjeux du tissu industriel local dans un premier temps. Dans ce cadre, une entreprise industrielle doit pouvoir faire ses choix en matière de :

- Système d'information cohérent permettant un flux d'informations adapté au flux de matières en manipulant des données disponibles, sécurisées, et agrégées,
- Organisation pour une entreprise plus agile (planification, conception simultanée, gestion des aléas, ...),

- Environnement permettant de répondre aux exigences d'une entreprise écoresponsable (efficace en consommation d'énergie, de matière, ...),
- Personnel formé aux nouvelles technologies et autonome.

Il est à noter également que cette plateforme R&D vise également à renforcer la coopération européenne et internationale, qu'elle soit industrielle ou institutionnelle, de l'Institut FAYOL et du LIMOS à travers :

- Des projets européens notamment sur l'énergie, sur les questions d'intégration de données, les modèles de connaissance et ontologies, la mass customisation, l'agilité, ...,
- Des contacts avec le Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO, Stuttgart et avec Fraunhofer Institute IAIS/Universität Bonn dans le cadre de l'Université Franco-Allemande,
- Des collaborations avec des grands groupes industriels (Bosch, Siemens, Renault, ST Microelectronics, Casino, Nexter, ...),
- Une proximité avec les PME/PMI du territoire ligérien en lien direct ou via les pôles de compétitivité (VIAMECA, LUTB, ...) ou associations (MecaLoire, Numelink).

## 2. Description de la plateforme et de l'offre

IT'mFactory consiste donc en un maquettage sous forme de plateforme expérimentale de ce qui pourrait être, à moyen terme, le point à atteindre d'une transformation réussie d'une entreprise dans le cadre de l'industrie du futur. Elle constitue donc la cible visée par une entreprise et plus particulièrement les TPE/PME/PMI en termes de développements industriels de demain.

Cette plateforme expérimentale doit donc permettre de croiser les activités de recherche avec les problématiques d'évolution et de positionnement de ces entreprises.

Pour cela, l'information est traitée en prenant en considération la totalité de l'écosystème d'une entreprise. Le besoin du client est le point de départ à partir duquel est intégrée la conception du produit et de l'outil de production associé. Ensuite les flux de production et logistique (sous-traitance, livraison, matière) sont gérés jusqu'à la réalisation et réception en main propre du produit. Dans ce projet, l'Usine Numérique est étudiée selon les 5 composantes suivantes :

- **L'entreprise :**

Dans notre approche systémique de l'entreprise, nous souhaitons prendre en compte l'entreprise dans sa globalité. L'Usine Numérique doit pouvoir prendre en compte les besoins des entreprises en termes de conception, industrialisation, et fabrication des produits. Cette approche doit englober également les relations de l'entreprise avec ses partenaires et son environnement naturel. L'organisation du travail est prise également en compte comme composante transversale à cette transformation.

Pour cela l'entreprise doit avoir une infrastructure IT permettant de stocker les données dans le cloud tout en garantissant la sécurité et la confidentialité de ces dernières. Le réseau de

communication, filaire ou wireless, doit permettre une accessibilité, circulation et haute disponibilité des informations. De plus, afin de rendre tous les partenaires et systèmes interconnectés et interopérables, il est nécessaire d'adopter un langage commun, une norme d'échange et de communication pour les données.

Au travers de cette infrastructure, l'Internet des objets fait son apparition dans les lignes de production par l'intermédiaire du Machine to Machine, des systèmes multi-agents (processus, robot ou humain interagissant entre eux) et des capteurs ou outils intelligents.

Il est nécessaire aussi de sensibiliser et de préparer les entreprises industrielles dans ce changement. Des parcours alliant industriels et enseignants-chercheurs aideront les Ressources Humaines à identifier les moteurs ou freins à ces changements et analyser leur historique et organisations pour s'en servir au mieux.

- **Le client :**

L'Usine Numérique permet de réaliser une production de masse personnalisée. Il s'agit de produire de manière économique et viable des produits personnalisés répondant à la demande croissante de différenciation et personnalisation des clients. Les liens entre l'entreprise et ses clients s'en trouvent ainsi renforcés par la mise en place de ces services (mass customization, impression 3D).

- **Le salarié :**

Au travers des systèmes d'information et des objets connectés, l'aspect participatif du management est renforcé. Les employés participent à l'amélioration des processus. Ils ont aussi accès à des formations et des assistances plus collaboratives.

Les problématiques d'emploi pour les seniors sont prises en compte par l'avènement de nouveaux métiers liés à l'« Industrie du Futur », les enjeux ergonomiques et la nécessité de formations professionnelles adaptées (postes opérateurs adaptés et plus intuitifs, cobots).

- **Le produit :**

Il n'est plus seulement le résultat de la production, mais un élément de la chaîne de production. Il porte avec lui les informations nécessaires à son élaboration, sa traçabilité, sa destruction, mais aussi son évolution.

- **L'écosystème de l'entreprise :**

L'interopérabilité des systèmes d'informations rendant le travail plus collaboratif permet une meilleure connexion entre l'entreprise et ses partenaires. Le produit et la chaîne de fabrication sont co-conçus par le client, l'entreprise et ses fournisseurs. Les systèmes d'informations, la logistique s'interconnectent et ne font plus qu'un.

Concrètement 3 objectifs sont donnés à ce projet de recherche & Développement « IT'mFactory »:

- Objectif 1 : Développer un démonstrateur permettant aux industriels de s'identifier et de s'inscrire dans une perspective de transformation vers l'usine numérique. Il intégrera aussi les recherches sur les problématiques de l'industrie du futur et servira de plateforme sur laquelle s'appuyer pour développer et tester ses recherches,

- Objectif 2 : Proposer un outil d'évaluation de la performance globale permettant à l'entreprise de se positionner dans une perspective d'évolution vers l'usine numérique et d'identifier des préconisations,
- Objectif 3 : Créer un club d'entreprises, apporter des supports aux industriels, aux formations initiales et continues sur la transition industrielle vers une performance globale.



Figure 3.1 : La plateforme IT'mFactory

Dans cette plateforme, l'idée est donc de traiter l'information en prenant en compte le cycle de vie complet du produit qui est fabriqué, celui-ci devenant parfois lui-même un objet connecté dans l'Industrie du futur. L'interopérabilité des différents systèmes d'information de la pyramide CIM (Computer Integrated Manufacturing) paraît alors évidente si l'information est étudiée à travers ce prisme d'observation.

Au niveau de la pyramide CIM (Computer Integrated Manufacturing) et lors du cycle de vie du produit, chaque système sera maître d'une partie de l'information :

- Le PLM (Product Lifecycle Management) lors de la conception conjointe du produit et du process et une fois le produit réalisé,
- L'ERP (Enterprise Resource Planning) juste après la conception et jusqu'à la fin de vie du produit afin de gérer les commandes et les ressources de l'entreprise nécessaires à la production.
- Le MES (Manufacturing Execution System) lors de la fabrication du produit,
- Le SCM (Supply Chain Management) en amont et aval de la production afin d'assurer le transport des matières premières, produits semi-finis et finis,

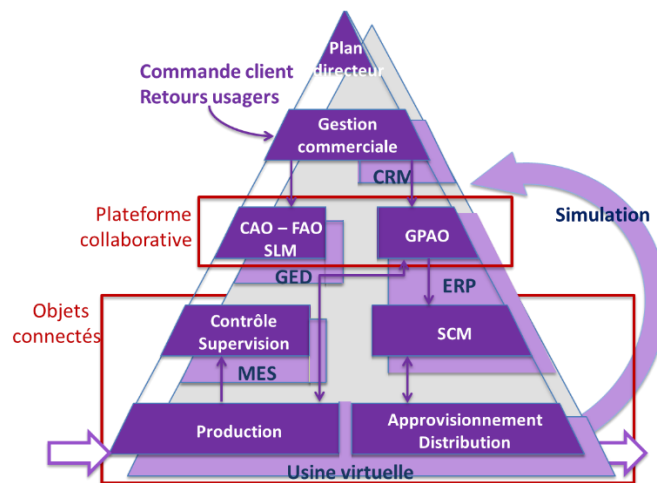


Figure 3.2 : Le concept CIM revisité dans IT'mFactory

Il ne faut pas oublier non plus la partie immergée de cet iceberg, à savoir l'ensemble des modèles d'aide à la décision qui vont se nourrir des informations et permettre aux décideurs de prendre la bonne décision au bon moment. Je parle ici des modèles d'analyse de données, d'optimisation et de simulation.

Le CIM peut donc être vu et conçu dans cette plateforme non plus comme un système pyramidal avec à sa tête l'ERP et une communication ascendante et descendante, mais comme plusieurs systèmes connectés autour des données de l'entreprise.

Au final, IT'mFactory, pour pouvoir représenter fidèlement cette intégration de données et de traitements, est constitué d'un ensemble de moyens physiques et virtuels, que l'on peut résumer en 4 grandes familles :

#### Supervision, excellence opérationnelle et qualité:

- Digital lean: suivi d'indicateurs en temps réel, suivi de documents, mise en place de formulaires, carte de contrôle ...,
- Réalité augmentée appliquée à l'aide au montage, à la maintenance et à la formation sur les postes de travail,
- Scanner 3D pour le contrôle tridimensionnel de pièces et reverse engineering.

#### Cobotique, machines et transitique:

- Une Transitique intelligente permettant de mettre en place une logistique agile et reconfigurable,
- Un AGV (Advanced Guided Vehicle) illustrant l'utilisation de drones dans le cadre industriel,
- Un Cobot (Robot collaboratif) supportant l'utilisation de moyens partagés avec un opérateur,
- L'Impression 3D comme nouveau mode de production et de conception.

Organisation/information:

- Personnalisation de masse par la mise en place d'une chaîne numérique composée de logiciels interopérables (ERP, MES, ...),
- Digital twin de l'organisation (utilisation de modèles de simulation) et des process de fabrication (par exemple : préparation des machines en temps masqué) pour une aide à la décision [CARDIN et al. 2019],
- Gestion et traitement des données (Big Data, Intelligence Artificielle),
- Cyber sécurité des données et des réseaux.

Développement durable et ressources humaines:

- RH et industrie du futur : acceptation et nouveaux modes de management à travers des mises en situation,
- R&D optimisation ergonomie et énergie, pour une aide à la décision multi-critère et multi-objectif,
- Réalité virtuelle qui permet de mettre en situation en vue de formation, labellisation dans un environnement complexe,
- Gestion de l'environnement et des cycles de vie Produits / Process.

L'ensemble de ces moyens physiques et digitaux est accessible en détail sur <https://www.itm-factory.fr>.

Ils supportent et permettent à la plateforme IT'mFactory d'offrir aux entreprises une offre complète R&D autour de leur transformation numérique :

- **Des formations sur catalogue** ou sur-mesure qui s'appuient sur une pédagogie active de type « Learning by doing » autour des thématiques du Digital Lean, des nouvelles technologies IT, de la place de l'Homme dans l'usine et de la transition énergétique et écologique,
- **Des transferts technologiques par des POC** (Proof Of Concept), pour tester de manière expérimentale et démontrer la faisabilité des choix organisationnels et techniques,
- Des expertises afin de répondre aux problématiques des entreprises et organisations en lien avec leur développement et leur performance reposant sur une équipe pluridisciplinaire constituée d'experts de l'UIMM Loire et d'enseignants-chercheurs en Génie Industriel, Management et RSE, Environnement, Mathématiques, Informatique, Objets connectés et Sécurité informatique,
- **De l'accompagnement et du conseil** tout au long des projets de transformation.

L'offre de la plateforme peut être résumée au travers de la présentation des marqueurs essentiels de l'industrie du futur autour de 7 thématiques, définissant ainsi complètement l'ADN d'IT'mFactory :

- **Accompagnement au changement pour l'industrie du futur** : l'objectif est de présenter les changements en profondeur que représente le passage à l'industrie du futur : économique,

managérial et humain en détaillant les enjeux et les risques de la transition industrielle et numérique.

Ici se rejoignent en effet problématiques sociales et sociétales. Il s'agit bien évidemment de l'interface homme/machine du point de vue ergonomique mais aussi, plus fondamentalement, sur le rapport de l'homme et de la technologie. Les enjeux industriels sont donc indissociables des enjeux sociaux et sociétaux, ils ne les précèdent pas. La diffusion technologique (par exemple des robots collaboratifs) et numérique (par exemple des dispositifs de réalité augmentée connectés) doit se faire dans une intégration mutuelle (sans entrave de sécurité en particulier) entre l'homme et la machine, en tenant compte de l'immense variété et différence de contexte, notamment au sein des ateliers, et plus largement dans les entreprises.

On doit faire évoluer les interactions internes et externes des entreprises, c'est-à-dire adapter la gouvernance et le management, adopter une approche collaborative pour faire face aux craintes des salariés vis-à-vis de la transformation digitale, favoriser l'apprentissage collectif (par exemple à travers des tutorats/mentorats entre salariés), valoriser les compétences des salariés et faire émerger une nouvelle forme de gouvernance favorisant la RSE.

Il faut également composer avec son écosystème digital à travers l'adoption de nouveaux business-model numériques, l'anticipation des futurs écosystèmes digitaux (ex. : comment l'entreprise peut contribuer ou s'inscrire dans les développements des smart-cities), et la sensibilisation à l'importance de la cyber-sécurité. Adopter une approche sectorielle et territoriale à travers le développement de communautés locales « Industrie du Futur » où les entreprises peuvent échanger sur les pratiques va permettre de fluidifier l'accès à l'emploi.

Il faut renforcer cette gouvernance partagée visant à décroïsonner le développement économique, l'emploi et la formation en rassemblant autour de la table l'ensemble des parties prenantes (régions, départements, villes, partenaires sociaux, etc.) pour construire un plan d'action à l'échelle la plus pertinente. Afin d'intégrer une vision prospective, les territoires peuvent accompagner les entreprises en leur proposant une cartographie des ressources disponibles et un plan de communication.

- **L'homme au centre de l'industrie du futur** : Dans le contexte de compétitivité mondiale sur les coûts de production, de besoins accrus de flexibilité et d'agilité des moyens de production (avec personnalisation des produits), les processus industriels cherchent à tirer le meilleur parti de la révolution numérique et/ou technologique en combinant au mieux la flexibilité et l'expertise humaine avec la performance technologique.

Il s'agit donc d'optimiser la place de l'homme dans l'usine : focaliser son rôle sur la plus forte valeur ajoutée (expertise de geste, de diagnostic, etc.), le décharger des tâches pénibles physiquement ou cognitivement, tout en garantissant son bien-être dans l'organisation, source de performance.

Il faut décroïsonner, individualiser, industrialiser la formation et l'accompagnement à travers la Formation continue (rendre plus lisible l'offre proposée dans le cadre des Comptes Personnels

de Formation et voir le numérique comme moyen de proposer des offres sur mesure (séquences virtuelles / présentielles ; synchrones / asynchrones)) et la Formation initiale (l'évolution des métiers futurs requiert la transformation des offres de formation proposées par les universités en s'appuyant sur les besoins signalés par les entreprises).

Il faut également élargir l'accès à l'Open Data « Emplois » à travers la mise en commun d'un maximum de données sur une plateforme publique de mise à disposition de données en termes d'emplois et de compétences.

- **RSE et Management environnemental** : nous mettons également l'accent sur les enjeux de la transition écologique et du développement durable dans nos entreprises en évoquant l'écoconception, l'analyse de cycle de vie ainsi que l'efficacité énergétique comme leviers de performance. Il apparaît évident aujourd'hui de les intégrer dans notre démarche de transition. Cela passe notamment par une identification des intérêts et des enjeux pour être capable de maîtriser son impact environnemental dans nos projets.

La politique environnementale vient souligner cette prise en compte d'un point de vue stratégique au niveau de l'entreprise. On y retrouve par exemple la maîtrise de la consommation énergétique qui est très souvent un élément pris en compte dans les projets de transition et qui conditionne parfois le choix de l'entreprise.

- **Digital Lean** : Le Numérique permet de pousser plus loin le Lean manufacturing, et ceci passe non seulement par de nouvelles technologies, telles que les lunettes connectées, mais aussi par de nouveaux outils informatiques qui donnent à des technologies déjà existantes (écrans tactiles, tablettes...) une nouvelle maturité industrielle.

Associer le digital et le lean permet ainsi d'améliorer la réactivité par l'automatisation des remontées de données par exemple (en les fiabilisant par la même occasion) [BAUTERS et al. 2018] et d'offrir une meilleure ergonomie pour les collaborateurs, et ainsi aboutir à un meilleur management des activités de son entreprise.

- **L'agilité des organisations** : comment de nouveaux outils peuvent répondre à des demandes clients de plus en plus variées tant au niveau de la chaîne de production que logistique ?

L'agilité recouvre des questions de flexibilité, de réorganisation régulière des systèmes et processus. On n'est plus dans des changements ponctuels, ces changements sont amplifiés par l'évolution du numérique et on a besoin d'aligner les choix industriels de flexibilité, de reconfigurabilité [LAMECHE et AL 2017], d'agilité, sur un contexte stratégique qui est propre à l'entreprise [VALENCIA et AL 2019].

- **SI et collecte des données** : aujourd'hui une entreprise est étendue souvent sur plusieurs sites, et malgré tout il faut que ce soit une seule entreprise : il faut donc aller vers une entreprise intégrée. Cette nouvelle entreprise va d'une entreprise Fabless à une usine qui n'est qu'un site de production, avec toutes les déclinaisons intermédiaires.

Cette nouvelle architecture fait intervenir et nécessite l'interconnexion de nombreux éléments hétérogènes en termes de moyens de production, d'organisation et de système d'information. On peut mentionner le fait que les communications sont réalisées au travers des

opérateurs historiques (orange, sfr, ...) et se font au travers de l'internet, mais que l'IoT introduit de nouveaux réseaux et de nouvelles architectures pour l'échange d'informations qui font de plus en plus appel au cloud. Ceci change la manière dont on peut gérer le SI de l'entreprise. Celui-ci n'est plus forcément internalisé ou géré physiquement dans les locaux de l'entreprise, on a de nouveaux sous-traitants qui apparaissent pour la gestion des données.

À cause de cette architecture générale, les données deviennent de plus en plus importantes au fonctionnement de l'entreprise. Les outils de collecte, le SI, les communications sont donc devenus essentiels.

De plus, si historiquement le SI (IT) et les outils de production étaient indépendants, la convergence des technologies utilisées par ces deux entités fait qu'on les relie et on tire de plus en plus profit de ce décloisonnement/rapprochement.

La disponibilité, l'intégrité (qualité) et dans certaines situations la confidentialité des données utilisées doit être prise en compte très en amont dans les projets de déploiement du SI. Il faut avoir une vision systémique, il n'est pas possible de prendre chaque thème indépendamment. Il faut prendre en compte l'hétérogénéité des données et de leurs formats, et de leur moyen d'acheminement et de stockage. La problématique temps réel est également présente, et s'y ajoute la volumétrie (masse de données à manipuler).

Pour finir, la notion de cyber-sécurité doit être prise en compte à toutes les étapes en fonction des risques identifiés, l'analyse de risque étant un point préliminaire essentiel dans l'ensemble de la démarche.

- **Analyse des données et aide à la décision** : toutes ces données collectées ou stockées sont exploitées et utilisées au niveau décisionnel de l'entreprise.

Dans une approche visant à positionner les différents outils et méthodes en fonction des aspects temporels et de la complexité des modèles sous-jacents, nous obtenons (en exceptant la notion de « règle de trois »), la cartographie suivante :

La supervision : avant de prendre des décisions il est important de suivre et de piloter les procédés de fabrication automatisés. Cette première brique va notamment permettre de diagnostiquer et de surveiller le système. Brique d'assez bas niveau, la supervision nécessite peu de modélisation.

Le MES : ici on va plus loin dans le monitoring, avec des indicateurs de performances tels que les TRS, TRG, TRE (énergétique). On va pouvoir gérer l'ordonnancement, avoir des remontées d'informations sur la qualité, planifier les tâches de maintenance préventives grâce aux données issues du terrain. On va pouvoir faire de la reconnaissance de pannes et définir des outils mathématiques, qu'on appelle aujourd'hui IA, Machine Learning, pour pouvoir anticiper et prévenir ces pannes par la détection de patterns. On va par exemple collecter des données sur des plateformes comme Mindsphere (Siemens) pour les traiter ensuite soit par des outils « maisons », soit en s'adossant à des entreprises comme BrainCube.

Parmi les éléments les plus complexes, on retrouve l'optimisation et la simulation qui vont souvent de pair. L'objectif ici va être de modéliser un problème afin soit d'en déterminer une

solution exacte/approchée de bonne qualité, soit d'évaluer la performance d'un système. Le choix d'un outil ou d'un autre dépend grandement de la complexité du problème étudié et de la modélisation de comportements difficiles à représenter mathématiquement.

L'ensemble de ces approches (analyse de données, systèmes experts, ...) existe depuis les années 40... même si elles bénéficient des avancées technologiques évidemment. On peut dire que c'est un univers connu (supervision et optimisation/simulation) qui continue de se développer.

Cependant, il y a une tendance qui vise à intégrer l'ensemble de ces technologies au travers de ce que l'on nomme Jumeau Numérique. Il tend à faire le lien entre simulation pure et le monde réel dans lequel il évolue dans le but d'aider à la décision. Aujourd'hui on n'en est plus à l'étape de R&D : il faut remonter des données réelles du PLM pour être à jour sur le système, avoir des automates adaptés, ... la mise en œuvre d'un jumeau numérique nécessite des compétences transverses et collaborations poussées entre les équipes, voire de monter des équipes projets comportant l'ensemble des corps de métiers nécessaires.

Cette description sommaire des différents angles de vues avec lesquels nous regardons l'entreprise dans sa transformation numérique, démontre une vision systémique assez complète et permet dès aujourd'hui le développement de projets de recherche partenariale. La section suivante fait le focus sur deux d'entre eux qui viennent de commencer.

## 2. ACTIVITÉS DE RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT AUTOUR DE IT'mFactory

---

### 1. Preuve de concept avec la start-up OPTI'WAVES

L'objectif est de travailler à travers un projet financé dans le cadre des appels d'offre EASYTECH du pôle de compétitivité MINALOGIC, sur l'accompagnement d'une start-up qui construit des fours à micro-ondes pour cuire de la céramique.

Le besoin de cette entreprise est de construire la chaîne numérique autour de son produit, de la conception jusqu'à l'exploitation chez le client, à travers le questionnaire suivant :

- **Stratégie Numérique** : Définir le cahier des charges des informations à connaître pour répondre aux objectifs du Partenaire – préservation de ses savoir-faire, traçabilité, maintenances prédictive et préventive, contrôle qualité, amélioration continue, gestions logistiques, expériences utilisateurs, modèle économique – et pour déterminer les orientations des lots suivants (T0 + 3 mois).
- **Cybersécurité et Architecture Réseau** : Expertiser le niveau actuel de sécurité matérielle et logicielle du four et proposer les adaptations nécessaires du four et de ses réseaux de communication pour garantir au Partenaire un mode de fonctionnement du four à la fois performant et adapté, en lien avec les lots 3 à 5, et assurant la confidentialité de ses secrets de fabrication. (T0 + 6 mois)

- **Indicateurs Clef de Performance et Tableaux de Bord** : Déterminer les indicateurs appropriés d'aide à la décision et les tableaux de bord de gestion et prospectifs conformes à la stratégie numérique du Partenaire. (T0 + 6 mois)
- **Analyse des données** : Déterminer les données pertinentes à remonter du four et proposer les méthodes associées d'analyse exploratoire, en lien avec le lot 4, permettant au Partenaire d'obtenir les bonnes informations. (T0 + 6 mois)
- **Accompagnements** : Accompagner en tant qu'expert indépendant le partenaire dans ses relations avec ses fournisseurs et ses autres partenaires industriels pour négocier, spécifier, superviser et coordonner la fabrication du four, la fourniture des services informatiques de transport et de stockage réseau, la fourniture des outils et services informatiques d'analyse des données, d'indicateurs de performance et de tableaux de bord de construction des informations et d'aides à la décision (T0 + 18 mois).

Ce projet va commencer au deuxième semestre 2020, et j'en suis le référent École.

## 2. POC avec une entreprise de construction de machines spéciales

L'objectif est de travailler avec l'entreprise MECACONCEPT (conception et réalisation de machines spéciales à Saint-Étienne) et l'entreprise CREATIVE IT (éditrice de logiciel MES) autour de la cobotique mobile intelligente.

Ce projet a fait l'objet d'un dépôt auprès du soutien aux projets collaboratifs R&D de la région AURA, appelés projets BOOSTER. Le montant total de la subvention obtenue est de 500000 €, pour un budget totale d'environ 1 M€ et un démarrage au dernier trimestre 2020.

Ce projet vise à développer une méthodologie générique permettant le déploiement et le fonctionnement flexible de robots assistants mobiles (AGV/cobot/vision 3D) dans un environnement industriel humain-machine. Le projet suivra une conception par l'usage en plaçant l'humain au centre de notre méthodologie ; pour ce faire nous élaborerons plusieurs scénarii permettant de contextualiser le rôle d'un robot assistant mobile. La méthodologie sera validée par le développement d'un pilote en espace industriel simulé sur la plateforme IT'mFactory.

Les axes majeurs structurant du projet sont :

- La conception d'un système d'information adaptable et interopérable facilitant la supervision entre les différents acteurs d'une ligne de production (MES, automates, machines, opérateurs robot assistant mobile...),
- L'élaboration d'un langage de description et d'action pour les différents composants d'une usine dont la flexibilité pourra être illustrée avec le robot assistant mobile,
- À partir des modules de vision 3D déjà développés par MECACONCEPT, le développement d'applications embarquées de gestion des échanges avec AGV robot et capteur 3D sur des scénarii définis, et l'adaptation du module de vision 3D pour le robot assistant mobile et son intégration dans le système d'information,

- La conception d'une méthode générique de contrôle du robot assistant mobile.

La réussite du projet reposera sur la complémentarité des compétences des partenaires du projet (Creative IT, Institut H. Fayol, MECA-CONCEPT) et sur l'intégration de l'ensemble de la chaîne de valeurs allant du système d'information aux machines à commande numérique.

### **3. PERSPECTIVES DE RECHERCHE & DEVELOPPEMENT AUTOUR DE IT'mFACTORY**

#### **1. Investigation de nouvelles méthodes de pilotage**

Il est intéressant de regarder la naissance de nouveaux « OVNI » dans le domaine de la gestion industrielle. À ce jour encore, les réflexions scientifiques et industrielles autour de méthodes comme CONWIP ou DDMRP en sont à leurs balbutiements. La principale raison est, à mon avis, le décalage structurel entre la vie « scientifique » et la vie « industrielle » qui montre souvent un fossé entre ce qu'il faudrait faire et ce qui est fait en étant généralement le « nez dans le guidon », poussé par des réalités économiques que l'on ne peut nier. La seconde raison est que dans ce domaine, la diffusion ou le déploiement industriel de telles méthodes passent obligatoirement par les fourches caudines des cabinets de consulting, qui en font une de leurs principales sources de profit : tout dépend donc de la force de ces cabinets à les pousser et les promouvoir pour garantir le seuil minimum de survie au-delà de l'effet de mode de la nouvelle méthode.

Après des années de succès, le Lean Manufacturing n'est malheureusement plus aussi adapté pour répondre seul à des marchés caractérisés par des changements rapides de production et par le développement de la « mass customisation ».

Dans ce contexte, le QRM (Quick Response Manufacturing) peut être une nouvelle réponse pour la stratégie à adopter pour tirer profit de cette variabilité de la demande. Cette méthode QRM a été créée et développée depuis plus de vingt ans par le Professeur Rajan Suri, professeur émérite à l'Université du Wisconsin à Madison (USA). Le QRM est une stratégie globale d'entreprise dont le but est de réduire les délais, tant internes qu'externes.

Selon [FILHO 2012], l'objectif recherché de cette méthode est de concevoir et fabriquer rapidement des produits pour répondre aux besoins spécifiques des clients, mais aussi réduire les délais de toutes les tâches au sein de l'entreprise. Le QRM devrait permettre de gérer la variabilité à un niveau stratégique, et qui plus est, également dans des délais courts. Cet atout majeur donnerait aux entreprises un avantage concurrentiel de compétitivité et de croissance durable, en préférant la compétition du temps à la vaine et destructrice compétition des coûts.

En effet, toujours selon [FILHO 2012], l'approche QRM, c'est avant tout quatre notions-clés :

- **Penser réduction du temps au lieu de réduction des coûts.** Prendre conscience du pouvoir du temps : quels sont les gaspillages qui pourraient être réduits voire supprimés ? Quelles seraient les nouvelles opportunités de marchés pour une entreprise, si les délais étaient réduits de 90% ?

- **Penser structure polyvalente et flexible au lieu de structure fonctionnelle rigide.** Une "cellule QRM" est un ensemble de ressources dédiées, multifonctionnelles, localisées au même endroit, qui réalisent un ensemble d'opérations ininterrompues en toute autonomie, avec un seul objectif : la réduction des délais !
- **Comprendre et valoriser la dynamique des systèmes.** Planifier stratégiquement sur les ressources de la capacité disponible car dans un environnement à forte variabilité, un plan de charge des ressources au-delà de 85% voire 75% entraîne mécaniquement un allongement des délais.
- **Déployer une stratégie unifiée pour toute l'entreprise.** Au-delà de l'optimisation de l'atelier, l'approche QRM est tout-à-fait adaptée pour réduire également les délais des opérations administratives, de la gestion des approvisionnements, de l'introduction de nouveaux produits, du séquençement de la production, et même du système de planification.

De manière assez surprenante, cette méthode ou philosophie commence à porter ses fruits aux États-Unis, en Allemagne, mais fait partie des abonnés absents en France, bien qu'il existe un institut français du QRM, le QuickResponse Entreprise. Son taux de pénétration dans les entreprises françaises est assez limité alors que des publications internationales commencent à apparaître depuis quelques années.

Il me paraît intéressant de construire un programme de recherche partenarial autour de ce sujet, en y appliquant une démarche éprouvée sur le DDMRP, à savoir l'utilisation de notre environnement de simulation pour tester, in vitro puis sur des cas industriels, le comportement de cette méthode et de réaliser des preuves de concepts au sein d'IT'mFactory.

## 2. Participation à la construction d'une chaire industrielle sur « Digital Twin »

Depuis quelques mois, les réflexions menées au sein de l'IMT sur l'axe stratégique « Génie Industriel » ont amené un groupe d'enseignants-chercheurs porté par Xavier DELORME, à travailler sur la définition d'une chaire industrielle autour de la virtualisation de la production. J'ai souhaité m'intégrer et être force de propositions dans ce groupe de réflexion plus particulièrement sur les travaux à effectuer sur la notion de Digital Twin [ROSEN et al. 2015] [DATTA 2016] [KRITZINGER et AL 2018] et sur la mise en relation avec les offreurs de solution en terme d'outils (ANYLOGIC, FLEXSIM, ARENA, SIMIO, SIMU8, PLANT...) avec lesquels nous sommes en contact via la plateforme IT'mFactory.

L'objet, pour ce groupe de travail, du Digital Twin peut se résumer à travers les points suivants :

- Disposer d'une représentation en temps réel et à jour du système tel qu'il est déployé et configuré, et tel qu'il fonctionne à l'instant t,
- Prévoir, contrôler et optimiser le système en lien avec son environnement pour :
  - Gérer les modes de fonctionnement (nominaux, dégradés, en attente, en maintenance et/ou en arrêt) afin de conserver/améliorer ses performances et ses propriétés non fonctionnelles (performances, sûreté, sécurité...),
  - Réduire la variabilité,

- Accompagner la mise à niveau de la maquette de conception et du système de production,
- Gérer et optimiser la maintenance en conditions opérationnelles et suivre les opérations,
- Recueillir et stocker des données [UHLEMANN et AL 2017 b], des informations, des connaissances et des retours d'informations sur les opérations du système et son environnement (par exemple, les configurations du système) pour les opérations futures et leur démantèlement,
- Pour tester et former les opérateurs.

Cette notion de Digital Twin [SCHLEICH et al. 2017], n'a de sens que s'elle est reliée à la notion de Digital Mock-up (maquette numérique en phase de conception) que le groupe projet caractérise par les points suivants pour la conception et la réalisation de systèmes :

- Favoriser la modélisation du système et le cycle de validation et vérification, c'est-à-dire le prototypage virtuel du système avant le prototypage physique du système,
- Faciliter l'agilité et l'interactivité avec les différentes parties prenantes,
- Permettre la conception, la simulation, l'évaluation et la comparaison de solutions alternatives avant qu'une solution finale ne soit choisie,
- Partager les responsabilités de conception de produits entre des acteurs humains aux fonctions multiples au sein de l'entreprise et au sein de parties prenantes externes,
- Réduire les délais de commercialisation en identifiant les problèmes potentiels plus tôt dans le processus de conception,
- Réduire les coûts de développement des produits en minimisant le nombre de prototypes physiques à construire et potentiellement le nombre de tests à effectuer lors de la validation et de la qualification du système,
- Recueillir, stocker et retracer des données, des informations, des connaissances, des décisions et des commentaires des parties prenantes.

À la vue de l'intérêt de ces deux objets dans le cycle de vie du produit/process, il me paraît opportun, à partir des éléments présentés dans ce mémoire, de participer à la construction d'une réponse collective, à la problématique suivante : « Comment passer d'une maquette (permettant la validation technico-économique, environnementale, sociétale, ... de produits / services et systèmes de production de ces produits et services) à un ou plusieurs jumeaux (pour offrir un ensemble de fonctionnalités et de services à valeur ajoutée pour l'exploitation, la maintenance en conditions opérationnelles, la formation des opérateurs, la reconfiguration, le recyclage, ...) avec comme objectif final bien-sûr de toujours offrir de nouveaux services supplémentaires aux clients / exploitants de ces systèmes productifs.

La réflexion et le montage de cette chaire n'en est qu'aux prémices, mais il était important de montrer que nos actions sur la définition d'environnement de simulation trouvent un écho dans notre communauté, et plus particulièrement au sein de l'Institut Mines Telecom.

La réactivation et l'institutionnalisation d'un groupe de réflexion avec les offreurs de solutions et les sociétés de consulting autour de la simulation, avec comme objectifs d'aller vers la notion de digital twin, sera l'une de mes premières actions dans les mois qui viennent.

### 3. Développement des nouvelles offres de formation/action

Fort de notre expertise et du retour d'expérience sur le mastère spécialisé Management de la Transition Industrielle (MTI), l'Institut Fayol souhaite offrir de nouvelles formations autour de l'industrie 4.0 adaptées aux besoins des professionnels en s'appuyant très largement sur la plateforme IT'mFactory.

Sur la base du contenu du mastère MTI, le groupe projet IT'mFactory, que je pilote, a travaillé pour proposer une démarche à 3 niveaux d'approche (Top Management, Middle Management, Collaborateurs terrain), avec une adaptation du contenu et du temps imparti à chaque Unité Pédagogique en fonction du public ciblé :

- GP 1 – Entreprise et son écosystème :
- GP 2 – Conception des systèmes : nouveaux modes de production
- GP 3 – Organisation et management des systèmes
- GP 4 – Excellence opérationnelle
- GP 5 – Technologie et systèmes d'information
- GP 6 – Environnement et RSE

Suivant les compétences acquises, il serait possible de valider un parcours par des ECTS du MS Management de la Transition Industrielle ou par un CQPM (Certificat de qualifications Professionnelles de la Métallurgie), par exemple le CQPM LEAN N° 0272 ou encore par un certificat de Mines Saint-Étienne.

#### OFFRE « TOP MANAGEMENT » :

Pour accompagner les dirigeants d'entreprises dans la construction de leur stratégie et le déploiement de leur projet de transformation numérique, nous proposons d'aborder les différentes thématiques avec une approche systémique. L'objectif est de leur donner les clés de réussite pour construire une feuille de route cohérente pour une usine 4.0 performante.

Les groupes pédagogiques permettent de se former sur toutes les composantes et de disposer des outils nécessaires pour déployer une stratégie Industrie 4.0 dans son entreprise. La formation permet de comprendre comment se définissent les axes 4.0 d'amélioration potentielles à prioriser en fonction des objectifs stratégiques de l'entreprise, les actions et les investissements à planifier.

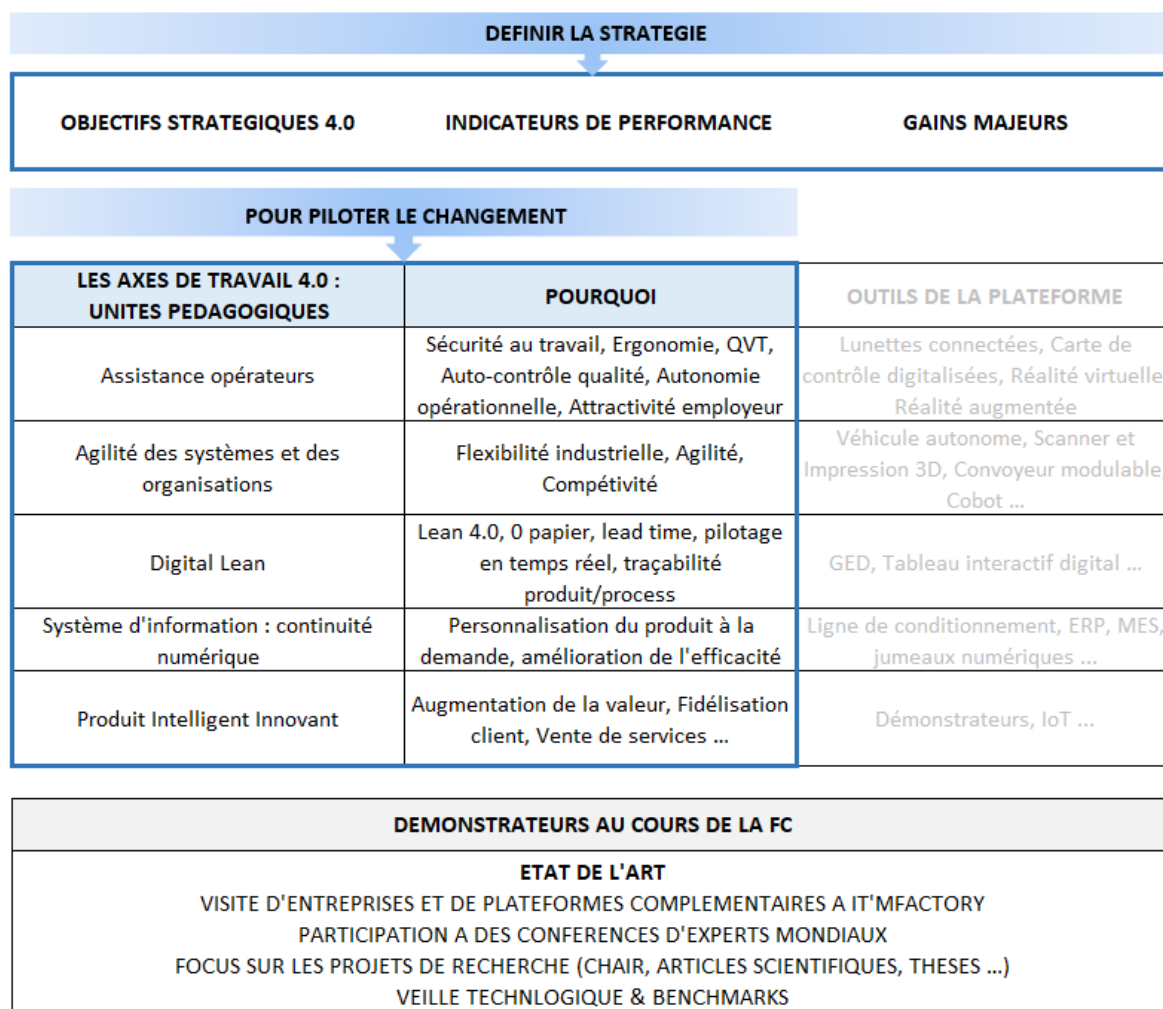


Figure 3.3 : Synoptique de la formation « TOP MANAGEMENT »

Tout au long de la formation, l'École des Mines s'efforcera de présenter un état de l'art dans ces domaines à travers, entre autres, des visites et des échanges avec d'autres plateformes complémentaires à IT'mFactory. À travers la présentation de projets de recherche, seront également abordés les verrous scientifiques auxquels s'attaquent les chercheurs du monde entier.

#### OFFRE « MIDDLE MANAGEMENT »

La 4ème révolution industrielle induit de nouveaux besoins en compétences dans le domaine du management industriel. Les managers de l'entreprise doivent se doter d'une vision transversale et de compétences multidimensionnelles qui allient compétitivité, innovation et excellence opérationnelle. La formation continue proposée est un moyen efficace pour monter en compétence et se former aux outils innovants disponibles, aux approches et aux méthodes couplant management et ingénierie.

La formation permet aux managers de comprendre et de retranscrire les enjeux liés aux projets de transformation dans leur entreprise. Ils doivent ainsi être capables d'appréhender ces transitions en

adoptant une approche gestion de projet : enjeux et impacts, ressources et compétences nécessaires, analyse SWOT ...

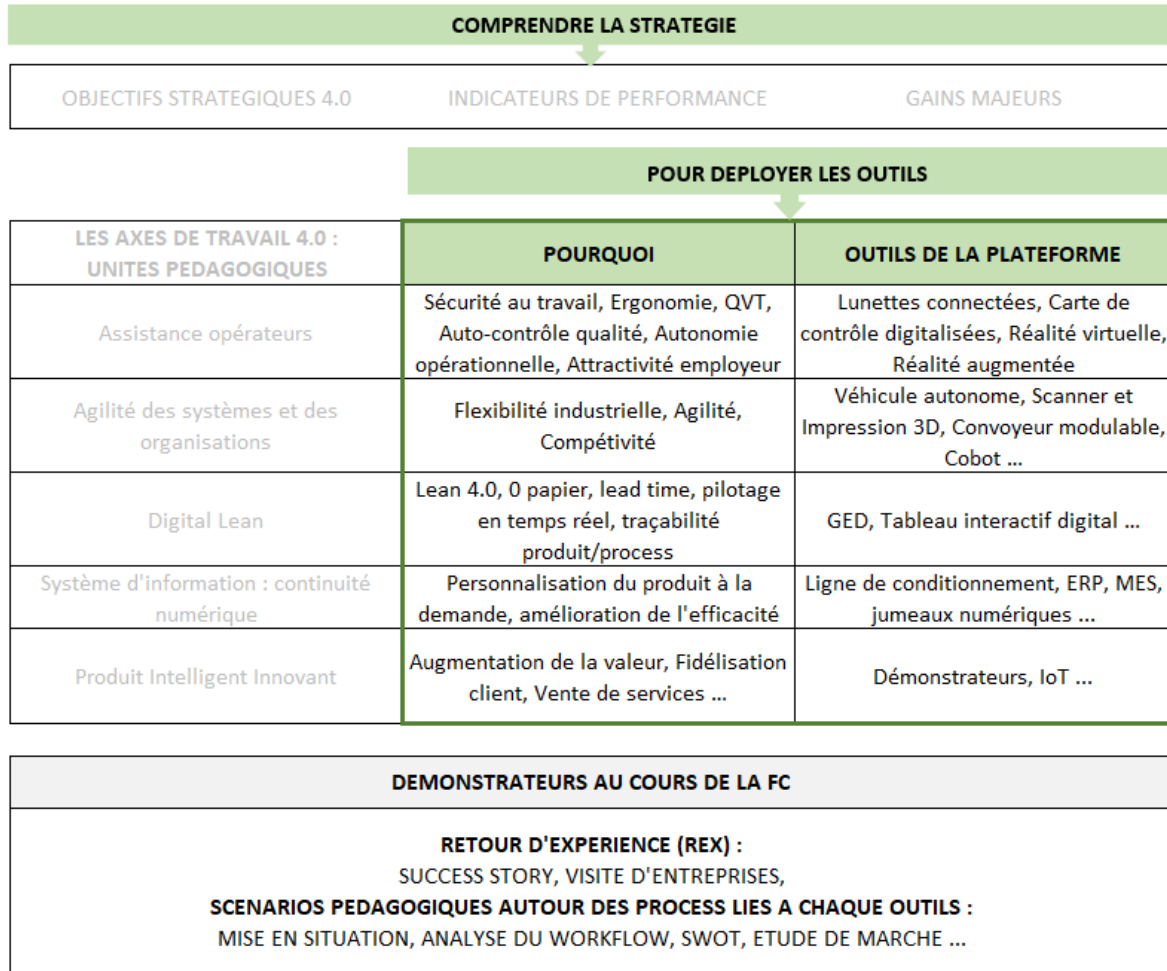


Figure 3.4 : Synoptique de la formation « MIDDLE MANAGEMENT »

Tout au long de la formation, l'Institut s'efforcera de présenter des retours d'expériences objectifs dans des entreprises utilisatrices de solutions innovantes. Les formateurs s'appuient sur une pédagogie active de type « Learning by Doing » pour une immersion totale dans un environnement de travail en mode gestion de projet.

OFFRE « COLLABORATEURS TERRAIN »

Dans cette transformation numérique, les opérateurs se retrouvent au cœur de ces révolutions technologiques en tant qu'utilisateurs quotidien de ces nouveaux outils. À ce titre il paraît indispensable qu'ils soient formés et qu'ils fassent partie intégrante des projets de transition. Au cours de la formation, un effort particulier sera porté pour :

- Vulgariser les nouvelles technologies qu'ils seront amenés à utiliser,
- Mettre en avant les contraintes et les atouts liés à l'intégration d'outils innovants.

L'objectif de la formation est de permettre aux collaborateurs « terrain » de prendre du recul sur les différents projets de transition dans leur entreprise et de se former aux outils mis à leur service.

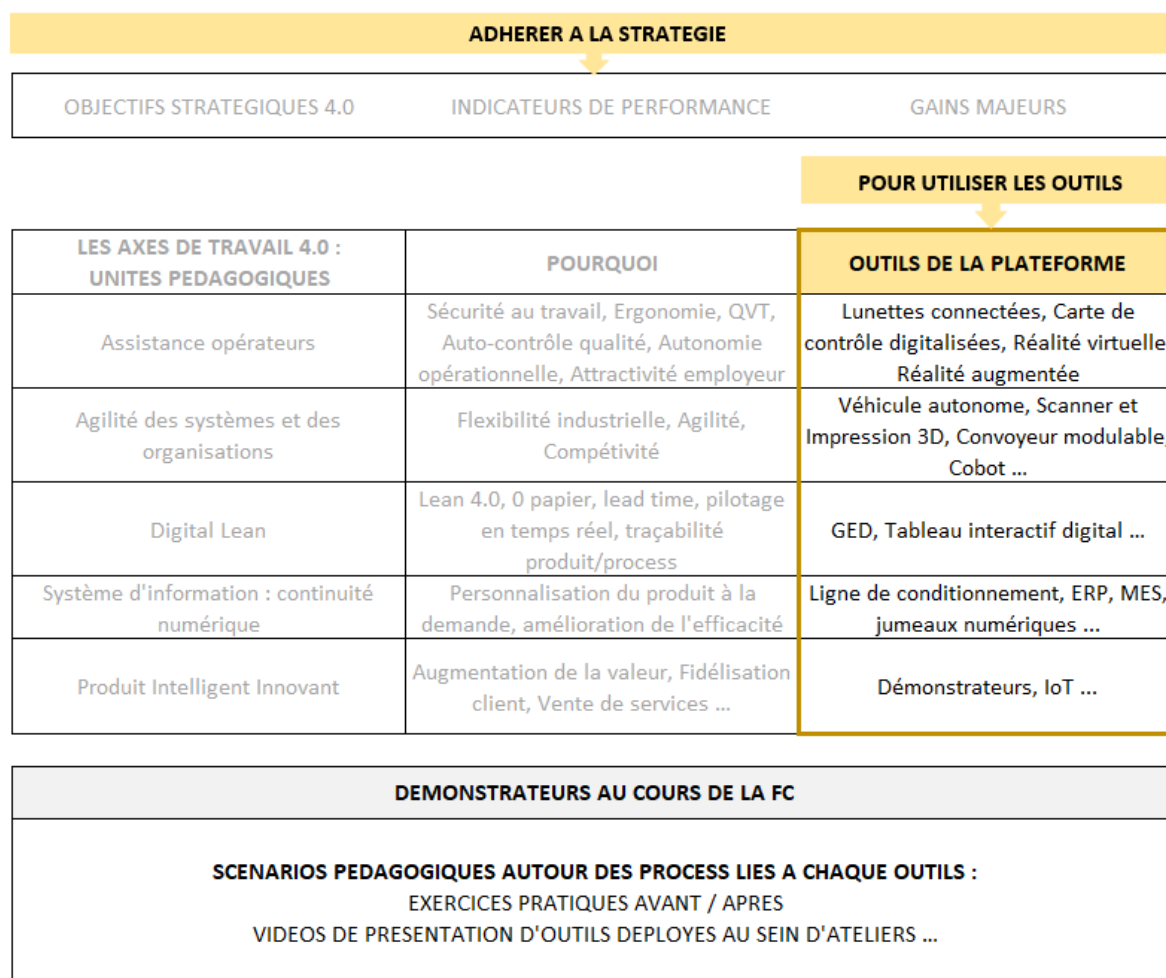


Figure 3.5 : Synoptique de la formation « COLLABORATEUR TERRAIN »

Tout au long de la formation, l'Institut s'efforcera à déployer des scénarii pédagogiques dans lesquels les opérateurs pourront prendre en main les outils pour en comprendre le sens et être capables de les utiliser de manière optimale.

#### 4. Participation au développement d'une nouvelle plateforme R&D à LYON

En lien avec la stratégie de Mines Saint-Étienne, et son positionnement de leader au sein de l'IMT sur la thématique Industrie 4.0, il a été décidé d'implanter Mines Saint-Étienne à Lyon, en complément à ses implantations Stéphanoises et Gardannaise.

J'ai participé à la réponse à un appel d'offre de la région AURA pour la mise en œuvre d'une « Usine de formation et de recherche » sur le site de Charbonnières-les-bains, à l'ouest de Lyon, sur l'ancien site du conseil régional.

Ce projet, nommé DIWII « Digital Intelligence Way for Industry Institute » et accepté par la région AURA en décembre 2019, est le fruit d'un partenariat public-privé large englobant sept partenaires : Mines Saint-Étienne et EM Lyon, co-chefs de file, de Sigma Clermont, 2MAtech, le CETIM, HumanToData, et Siemens.

Comme indiqué dans la plaquette de présentation, le projet est fondé sur le déploiement, à partir de 2020, d'une plateforme de grande ampleur (750 m<sup>2</sup> avec une capacité de 30 places de stagiaires en simultané) mettant en œuvre toutes les technologies de l'industrie du futur et intégrant le facteur humain. Cette plateforme sera accessible directement par les entreprises industrielles de la région. Elle servira de support à des activités de formation, de recherche et de conseil aux entreprises réalisées par les membres du consortium ou d'autres opérateurs.

Le projet s'organise en trois actions complémentaires :

- La formation, initiale et continue, en présentiel et à distance : l'acquisition des compétences nécessaires à l'industrie du futur qui est une priorité pour les entreprises régionales.
- Le conseil et l'accompagnement : s'équiper de nouvelles technologies n'est efficace que si les entreprises mettent en œuvre les changements que cela implique.
- La recherche appliquée : elle est indispensable pour le maintien à niveau et l'optimisation des outils, dans un contexte d'évolution continue des technologies. Diwii comporte également une forte dimension sociétale et environnementale.

L'objectif de cette plateforme, si l'on reprend les termes de la réponse à l'appel d'offre concerne la transformation numérique des entreprises, et pas uniquement selon l'axe technologique. C'est une transformation radicale de l'organisation même des entreprises : de nouveaux modes de production et de conception, de nouveaux process, plus d'agilité, un management repensé à tous les niveaux avec des organisations apprenantes, une relation client multi canaux mais aussi des enjeux de sécurité, de traitement massif de données et de frugalité énergétique.

DIWII proposera des services aux entreprises en réponse à ces nécessaires mutations vers l'industrie du futur :

- Développement stratégique, agilité, parties prenantes, international, modèles économiques, valeur data clients, ...
- Richesse humaine : responsabilités déléguées, qualité de vie au travail, talents, ...
- Modernisation des moyens physiques : flexibilité, productivité, production autonome, robotique/cobotique, fabrication additive, interfaces hommes-machines, ...
- Engagement environnemental : éco-efficience énergie et matière, technologies propres, écoconception, cycle de vie, sécurité ...
- Responsabilité Sociétale des Entreprises. Cette activité de conseil se traduira par des séances d'immersion ou par la réalisation de preuves de concepts utilisant les équipements physiques et digitaux de la plateforme.

- Modernisation des moyens numériques : intelligence dans les produits et process, supervision, data, auto- adaptivité, anticipation, intermédiation client/fournisseur, ...
- Excellence opérationnelle : optimisation continue, organisation et modes de management, ...

Au travers de cette feuille de route de cette plateforme, on retrouve l'ADN de notre démarche de Recherche et Développement et, en synergie avec le déploiement de la plateforme Stéphanoise ITmFactory, la participation au développement d'activités au sein de DIWII, me paraît être une évidence, notamment sur les interactions entre simulation et analyse de données. Le schéma ci-dessous les spécificités de ces deux plateformes.



Figure 3.6 : Spécificités des plateformes IT'mFactory et DIWII

Les premières pistes concernent essentiellement les axes suivants :

- La relation entre PLM et outils de simulation : l'objectif est de coupler le modèle de simulation avec le PLM, afin de garantir la qualité des données utilisées dans les modèles de simulation. On rejoint sur ce plan les actions définies dans le montage de la chaire « Virtualisation de la production »
- La relation entre Analyse de données et outils de simulation : Nous commençons à réfléchir à des preuves de concepts pour la mise en œuvre de jumeaux numériques de la ligne de fabrication que sera déployée sur la plateforme, et leur utilisation en tant que ligne virtuelle dans un couplage permettant de travailler sur des algorithmes de machine learning et d'apprentissage pour la détection de motifs de dysfonctionnements de la ligne (pour travailler sur la dérive en termes de qualité, de délais ou de coûts).

## CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, mes activités passées et présentes de Recherche, de Management de la recherche et des formations, de Transfert des connaissances vers des entreprises et des formations d'ingénieurs ainsi que des perspectives de ces activités sont présentées pour montrer le fil conducteur de mon parcours et mon projet scientifique.

Dans mon Curriculum Vitae, je présente une synthèse de l'ensemble de mes activités : travaux de Recherche & développement (en y intégrant mes projets de transfert industriel), réalisations en termes d'ingénierie de plateforme R&D, et responsabilités d'activités pédagogiques. J'ai également souhaité y présenter un aspect particulier de mon expérience professionnelle, avec une immersion dans des activités managériales très tôt dans ma carrière d'enseignant-chercheur. Si elle a été souvent très chronophage, encore plus que l'enseignement, elle m'a permis de comprendre assez vite le fonctionnement à la fois d'une institution telle que Mines Saint-Étienne, de ses relations avec l'ensemble de ses parties-prenantes, et de ce qui la compose au niveau « atomique », à savoir l'Enseignant-chercheur. Ces compétences sont pour moi essentielles pour pouvoir élaborer, piloter des projets de Recherche & Développement. Une vision épurée de la gestion de projet constitue à ce jour pour moi un atout majeur.

À la suite de ce Curriculum Vitae, j'ai repris plus en détail dans les trois chapitres qui composent la partie principale de ce mémoire l'essentiel de mes activités de Recherche.

Le premier chapitre concerne ce que je pourrais appeler les fondements de mes activités de recherche, à savoir la recherche de l'efficacité dans la construction de modèles de simulation. Cela passe par la définition d'un cadre méthodologique, adapté à l'évolution du besoin des entreprises (Industrie 4.0), d'un environnement de modélisation et d'outils de conception et développement de simulateurs pour rendre ce processus opérationnel. Les développements de Framework comme MAMA-S, puis MEMO I4.0 en sont les preuves, ainsi que l'approche complémentaire « in vitro ». Ce bundle permet d'avoir une collection d'outils ou de méthodes permettant de fournir le plus rapidement possible, avec la meilleure qualité de réponse, des solutions (validation de choix d'investissement, de méthode de pilotage, de choix organisationnels, ...) aux industriels, qui sont nos clients finaux en tant qu'enseignant-chercheur en Génie Industriel du Ministère de l'Économie et des Finances. Des clients intermédiaires, vecteurs importants auprès des entreprises également que sont nos élèves, ne sont pas oubliés dans cette démarche, à travers de nombreux modules de formations adressés à de nombreux profils d'élèves, modules issus de mon expertise « recherche » construite autour de la simulation des flux.

Dans le deuxième chapitre, je me suis intéressé au complément nécessaire des outils décrits dans le premier, à savoir ce que l'on doit tester dans nos modèles de simulation en termes de modes de pilotage pour améliorer sans cesse la flexibilité des entreprises. Cela passe par la bonne maîtrise des

aléas (soit en les supprimant, soit en les intégrant dans nos outils de gestion) et par l'analyse des nouveaux modes de pilotage de la production d'un point de vue pénétration industrielle.

Ces études ont permis d'adapter notre environnement de modélisation en prenant en compte les spécificités de ces nouvelles approches. C'est l'interaction de ces deux parties qui donne un vrai sens à mon travail de recherche et développement.

Souhaitant mettre en avant cette intégration, à la fois en termes de domaines scientifiques à travers une vision systémique et en termes d'activités sous-jacentes (formation, recherche, transfert), il paraissait donc naturel que je m'investisse ces dernières années sur la construction de plateformes de Formation et de Recherche, puis de Recherche & Développement. J'ai présenté dans le chapitre 3 une immersion dans ce projet de recherche à court, moyen et long terme. Ces plateformes qui apparaissent sur le marché sont le fruit d'un travail d'équipe, possible uniquement si l'on est capable de mobiliser l'énergie et la motivation d'experts variés, et grâce à un management adapté, de faire cristalliser tout cela dans des POC (Proof Of Concept) ou des scénarii de transfert. La plateforme en elle-même n'est que la partie émergée de l'iceberg, et le véritable objet construit est là aussi finalement un environnement de travail collaboratif où se mélangent les compétences, les points de vue, les objectifs et les manières de travailler. Au risque de me répéter, ce travail est passionnant, surtout lorsque l'on en touche du doigt les bénéfices, ce qui est le cas pour nos projets.

S'il me fallait résumer ce mémoire, j'espère vous avoir fait partager mon goût pour l'approche simulateur, aux reflets souvent philosophiques et métaphysiques (mais il faudrait pour cela un autre cadre de réflexion que ce mémoire, la peinture de la page de garde de ce document vous donne de la matière pour initier cette démarche...), la recherche appliquée et surtout mon intérêt pour le transfert qu'il soit de connaissances ou de compétences.

Comme la recherche du bonheur, le propre de ce travail est de savoir capter ces moments éphémères d'alignement de planètes, qui n'ont d'intérêt que parce qu'ils sont éphémères justement. À l'instant d'après, il n'en reste plus que le sentiment, et la force de repartir à la reconquête d'un nouveau moment de partage et d'agitation intellectuelle. C'est pourquoi ce mémoire n'avait de sens que s'il était accompagné d'éléments de perspective de travail pour les années futures, que j'ai développés également dans le chapitre 3. Les idées sont nombreuses, foisonnantes, parfois en différence (avance ?) de phase avec l'environnement de travail, mais j'ai essayé d'en détailler quelques-unes qui, je l'espère seront l'occasion de nouveaux projets... On peut citer, sans être exhaustif :

- La réflexion sur les « digital twins », derrière lesquels se cachent les problématiques d'interopérabilité des systèmes (Enterprise Resource Planning, Manufacturing Execution System & Modèles de simulation), de connexion des systèmes Information Technology « IT » (Informations et Systèmes d'information) et Operational Technology « OT » (Machines et Réseaux industriels type SCADA) en incluant les problématiques de cyber-sécurité, d'acquisition de données, via les IIOT (Industrial Internet of Things ), et la reconstruction

dynamique de la modélisation des process sous-jacents via des approches d'Intelligence Artificielle ( Machine Learning, Process Learning, ...).

La thèse démarrée avec ELM Leblanc et le groupe projet initié au sein de l'IMT en sont les premières pierres.

- La réflexion sur les nouvelles méthodes de pilotage de la production, notamment dans le cadre des PME. Il est important d'y intégrer dès le départ le pragmatisme de la solution à mettre en œuvre, sa simplicité de déploiement, et son adéquation à la reconfigurabilité de système en intégrant l'évolution du besoin client et de la maturité du marché. Cette démarche s'inscrit dans la philosophie « leagility » permettant d'allier les forces des démarches historiques et éprouvées du LEAN et de l'approche Agile, permettant une adaptation permanente et rapide aux nouveaux besoins.

La thèse démarrée avec SPACE a permis de jeter les bases de cette problématique, notamment à travers l'étude réalisée sur les PME en sous-traitance de l'aéronautique.

- La réflexion sur l'intégration de preuves de concept dans une méthodologie générale de recherche dans le domaine du Génie Industriel à travers l'évolution du concept de plateforme. Ces preuves de concept sont essentielles pour faire le lien entre les clients de nos activités de Recherche à l'IMT, à savoir les industriels, et les chercheurs eux-mêmes. Le concept d' « opérateur de confiance » est en train de naître.
- La réflexion, que je n'ai pas détaillée dans le chapitre 3, mais qui fait sens dans le cadre d'activités liées au PME, et dans la philosophie « systémique » qui me porte, autour de la création d'outils et méthodes DIGITAL LEAN LOWTECH. La démarche LEAN est souvent réactivée par la mise en place de solutions digitales (IIOT, Gateway, Cloud, ...) qui permet la remontée d'informations et donc une approche « data driven ». Les spécificités des PME sont la difficulté d'accès aux compétences, aux ressourcements et le manque de temps disponible pour innover sur des sujets de fond. Il est impératif de travailler en amont de la technologie pure (modélisation du Système d'information, RSE, innovation frugale, conduite du changement, ...). Il faut donc réfléchir, dans une approche centrée valeur-ajoutée, à des méthodes et des outils ne faisant interagir que des techniques offrant un bon compromis Fiabilité/Déploiement (vision 2D à la place de vision 3D par exemple) et un maximum de bons sens pratique. Cette réflexion n'en est qu'à son balbutiement, mais déjà des mini-preuves de concepts ont démarré dans IT'mFactory grâce à des projets R&D d'élèves et des financements région.

L'ensemble de ces actions prospectives décrites me permettront de continuer une activité de Recherche et Développement en lien avec les besoins des industriels face aux nouvelles problématiques de l'industrie 4.0. Ce challenge est plus que motivant, et se retrouve au sein de la stratégie de développement de Mines Saint-Étienne et de l'Institut Mines Telecom. Il faudra savoir saisir les opportunités internes et externes liées à ce positionnement pour créer une dynamique nécessaire

et suffisante permettant d'asseoir un ensemble d'actions (Programmes de recherche, Thèses, Chaires, Projets et Collaboration industrielles, ...).

Merci d'avoir eu le courage de me lire, en espérant que ce « voyage » en ma compagnie vous aura permis de mieux cerner ce qui me porte et ce pourquoi et à quoi j'ai envie de déployer mon énergie dans les années à venir.

## LISTE DES PUBLICATIONS

La liste ci-dessous reprend l'ensemble des publications réalisées dans le période 1997 – 2020. Ces publications sont reprises et mise en contexte dans le corps du texte de la partie principale de cette Habilitation à Diriger les Recherches.

### 1. ARTICLE DANS DES REVUES

---

1. Stephanie Bayard, Frederic Grimaud, Xavier Delorme. Is DDMRP an improvement over MRP2 in a regular and low volume context? – International Journal of Production Economics - **En soumission**
2. Przemyslaw Korytkowski, Frédéric Grimaud, Alexandre Dolgui. Exponential smoothing for multi-product lot-sizing with heijunka and varying demand. Management and Production Engineering Review, 2014, Volume 5 (Number 2), pp. 20-26. - **2014**
3. Kseniya Schemeleva, Xavier Delorme, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, Mikhail Y. Kovalyov. Lot-sizing on a single imperfect machine: ILP models and FPTAS extensions. Computers & Industrial Engineering, 2013, Volume 65 (Issue 4), pp. 561-569. - **2013**
4. Kseniya Schemeleva, Xavier Delorme, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. Multi-product sequencing and lot-sizing under uncertainties: A memetic algorithm. Engineering Applications of Artificial Intelligence, International Federation of Automatic Control, 2012, Volume 25 (Issue 8), pp.Pages 1598-1610. - **2012**
5. Mohand Essaid, Frédéric Grimaud, Patrick Burlat. Manufacturing network simulation using a data-driven model. International Journal of Simulation and Process Modelling, Inderscience, 2011, Vol. 6 (No.3), pp. 228 - 237. - **2011**
6. Mehdi Lamiri, Frédéric Grimaud, Xiaolan Xie. Optimization methods for a stochastic surgery planning problem. International Journal of Production Economics, Elsevier, 2009, 120 (2), pp.Pages 400-410. - **2009**
7. Mehdi Lamiri, Xiaolan Xie, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery. European Journal of Operational Research, Elsevier, 2008, 185 (3), pp.1026-1037. - **2008**
8. Alexandre Dolgui, M. Pashkevich, A. Pashkevich, Frédéric Grimaud. Forecasting risk analysis for supply chains with intermittent demand. International Journal of Risk Assessment and Measurement, 2008, 9 (3), pp.213-224. - **2008**
9. M. Cheurfa, Philippe Baptiste, Jean Pierre Campagne, Frédéric Grimaud. Prise en compte des contraintes liées aux ressources humaines en production : application à la production cyclique. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Hermès, 2006, Vol 40 (n°6), pp629-663. - **2006**

10. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean-Pierre Campagne. MaMA-S : An introduction to a methodological approach for the simulation of distributed industrial systems. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, 2003, 85 (1), pp. 11-31. - **2003**

## **2. CHAPITRE D'OUVRAGE, NUMEROS SPECIAUX & SESSIONS INVITE**

---

11. Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, Faicel Hnaien, Aly Mohamed Ould Louly, Session invite : Inventory control, replenishment and lot-sizing under demand, yield or lead time uncertainties, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Ottawa Canada, May 11-13 2015 - **2015**
12. Frédéric Grimaud, Alexandre Dolgui. Editorial : Discrete Event Simulation in Production and Operations Management. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, Inderscience, 2011, 6 (3), p175-176. – **2011**
13. Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, Ksenia Shchamialiova. Supply Chain Management under Uncertainties: Lot-sizing and Scheduling Rules. Benyoucef, Lyes; Grabot, Bernard. *Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management*, Springer, 510 p, 2010, Springer Series in Advanced Manufacturing. - **2010**
14. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean Pierre Campagne. Simulation of Distributed Industrial Systems. Dolgui, Alexandre; Soldek, Jerzy; Zaikin, Oleg. Supply Chain optimisation : product/process design, facility location and flow control, Springer US, pp. 277-287, 2005, Applied Optimization, 978-0-387-23581-3. - **2005**

## **3. COMMUNICATION DANS DES CONGRES**

---

15. Mahdi El Alaoui El Abdellaoui, Frédéric Grimaud, Paolo Gianessi, Xavier Delorme, Scalable, Reconfigurable simulation models in industry 4.0 – oriented enterprise modeling, Winter Simulation Conference WSC 2020, Dec 2020, – **2020**
16. Stephanie Bayard, Frederic Grimaud, Xavier Delorme, Discrete Event Simulation framework for Demand Driven MRP performances evaluation, ESM'2020, October 21-23, 2020, LAAS, Toulouse, – **2020**
17. Stéphanie Bayard, Xavier Delorme, Frédéric Grimaud. DMRP vs MRP2 : impacts of choice on financial and customer performance facing different demand profiles. *Twenty-first International Working Seminar on Production Economics*, Universität Innsbruck, Feb 2020, Innsbruck, Austria – **2020**
18. Mahdi El Alaoui El Abdellaoui, Frédéric Grimaud, Paolo Gianessi, Xavier Delorme. Integrated Decision Process to Design Manufacturing Systems towards Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, 2019, 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2019, 52 (13), pp.1373–1378. – **2019**

19. Stéphanie Bayard, Frédéric Grimaud. ENJEUX FINANCIERS DE DDMRP : UNE APPROCHE SIMULATOIRE. 12e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation–MOSIM'18, Jun 2018, TOULOUSE, France - **2018**
20. Olga Battaïa, Xavier Delorme, Alexandre Dolgui, Brigitte Finel, Frédéric Grimaud. Flow Line Balancing Problem: A Survey, International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 2015), Oct 2015, Seville, Spain. p. 1065-1071 - **2015**
21. Afafe Zehrouni, Xavier Delorme, Dominique Feillet, Frédéric Grimaud, Olivier Guyon. Toward a robust integrated optimization of timetable, rolling stock and crew, 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo2015), Mar 2015, Narashino, Japan. - **2015**
22. Afafe Zehrouni, Xavier Delorme, Frédéric Grimaud, Olivier Guyon. Planification robuste et intégrée des ressources ferroviaires, 16ème congrès de la société française de recherche opérationnelle et aide à la décision (ROADEF), Feb 2015, Marseille, France. **2015**
23. Afafe Zehrouni, Frédéric Grimaud, Olivier Guyon, Xavier Delorme, Dominique Feillet. Évaluation de la robustesse des plans de transport ferroviaires par simulation. ROADEF - 15ème congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision, Feb 2014, Bordeaux, France - **2014**
24. Alexandre Dolgui, Kseniya Schemeleva, Xavier Delorme, Frédéric Grimaud. Lot-sizing and lot sequencing on a single imperfect machine with breakdowns and product rejects. 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS), Jul 2014, Barcelone, Spain. - **2014**
25. Afafe Zehrouni, Frédéric Grimaud, Xavier Delorme, Dominique Feillet, Olivier Guyon. Evaluation par simulation de la robustesse des plans de transport ferroviaires. Conférence Internationale sur la Modélisation, l'Optimisation et la Simulation : de l'Economie Linéaire à l'Economie Circulaire (MOSIM 2014), Nov 2014, Nancy, France. 7p - **2014**
26. Kseniya Schemeleva, Xavier Delorme, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. Experimental study of a decomposition approach for a sequencing and lot-sizing under uncertainties. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM'2013), Oct 2013, Rabat, Morocco. 10 p. - **2013**
27. Olga Battaïa, Xavier Delorme, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. Integrated Decision Making in Flow Line Balancing. N. Bakhtadze, A. Dolgui, V. Lototsky. 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, 2013, Jun 2013, St Petersburg, Russia. Elsevier Science, IFAC PapersOnline.net, Volume 7 (Part 1), pp. 831-838 - **2013**
28. Kseniya Schemeleva, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, Xavier Delorme, Mikhail Y. Kovalyov. Production Lot Sizes on a Single Imperfect Machine: FPTAS vs ILP Models. Borangiu, Theodor, Dolgui, Alexandre, Dumitrache, Ioan, Filip, Florin Gheorghe. 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM12), May 2012, Bucharest, Romania. Elsevier Science, Volume# 14, pp 590-595 - **2012**

29. Mohand Lounes Bentaha, Olga Battaïa, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. A stochastic formulation of the disassembly line balancing problem. 25-th Conference on Operational Research (EURO'2012), Jul 2012, Vilnius, Lithuania. p 127 - **2012**
30. Evgeny R. Gafarov, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. Two Dedicated Parallel Machines Scheduling Problem with Precedence Relations. International Annual Conference of the German Operations Research Society (OR'2012), Sep 2012, Hannover, Germany. Springer International Publishing, pp 403-408, 2014, Operations Research Proceedings - **2012**
31. Sonia Rouibi, Patrick Burlat, Frédéric Grimaud. Réduction des stocks d'une chaîne logistique via différents mécanismes de coordination. 12e congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2011), Saint Étienne, France. pp. 5-6 - **2011**
32. Alexandre Dolgui, Ksenia Shchamialiova, Frédéric Grimaud. Solution methods for a multi-product lot-sizing and sequencing problem in a flow-shop. 12th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications (2010), Jul 2010, Villeneuve d'Ascq, France. Volume # 9 (Part# 1) - **2010**
33. Alexandre Dolgui, Kseniya Schemeleva, Frédéric Grimaud. A lot-sizing and scheduling problem under uncertainties. Workshop New Challenges in Scheduling Theory, Jul 2010, Lisbon, France. p 285 - **2010**
34. Ksenia Shchamialiova, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. Une approche génétique pour un problème de lotissement et de séquençement sous aléas. 8e Conférence Internationale Modélisation et Simulation (MOSIM'10), May 2010, Hammamet, Tunisia - **2010**
35. Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud, Genrikh Levin, Ksenia Shchamialiova. A new problem of lot-sizing and sequencing under uncertainties. 23rd European Conference on Operational Research, Jul 2009, Bonn, Germany - **2009**
36. Ksenia Shchamialiova, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. A Genetic Algorithm Based Approach for Multi-Product Lot-Sizing and Sequencing Problem Under Uncertainties. 42th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Aug 2009, Shanghai, China. 6p - **2009**
37. Mohand Essaid, Frédéric Grimaud, Patrick Burlat. Supply chain performance measurement using simulation : an overall equipment effectiveness based analysis. 7ème conférence internationale de modélisation et simulation (MOSIM'08), Mar 2008, Paris, France - **2008**
38. M. Essaid, Frédéric Grimaud, Patrick Burlat. Manufacturing network simulation: analysing material flow connectivity among dissimilar production systems. 15th International Working Seminar on Production Economics, Mar 2008, Innsbruck, Austria. 1, pp.165-176 - **2008**
39. Vincent Augusto, Xie Xiaolan, Frédéric Grimaud. A Framework for the Modeling and Simulation of Health Care Systems. International Conference on Automation Science and Engineering, Sep 2007, Scottsdale, United States. IEEE, pp. 231 – 236 - **2007**
40. Vincent Augusto, Xie Xiaolan, Frédéric Grimaud. A simulation framework for health care systems. The 33rd International Conference on Operational Research Applied to Health Services (ORAHS'2007), Jul 2007, Saint Étienne, France - **2007**

41. M. Essaid, Frédéric Grimaud, Patrick Burlat. Proposition d'un modèle d'intégration d'entreprises pour la simulation d'un réseau logistique. 7ème congrès international de génie industriel (CIGI'07), Jun 2007, Trois Rivières, Québec, Canada - **2007**
42. M. Lamiri, Frédéric Grimaud, X. Xie. Optimization Methods for Surgery Planning Under Uncertain Demand for Emergency Surgery. A. Dolgui, G. Morel, C. Pereira. 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM'06), May 2006, Saint-Étienne, France. Elsevier Science, 3, pp.633-638, ISBN : 978-0-08-044654-7 - **2006**
43. E. Lebureau, Frédéric Grimaud, Xavier Boucher, Patrick Burlat. Etude de connectabilité d'entreprises pour la configuration de chaînes logistiques. GOURGAND Michel, RIANE Fouad. Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation (MOSIM'06), Apr 2006, Rabat, Morocco. Lavoisier TECHNIQUE & DOCUMENTATION, 1, pp. 449-458, ISBN : 2-7430-0893-8 - **2006**
44. M. Cheurfa, P. Baptiste, Jean Pierre Campagne, Frédéric Grimaud. Operator's Assignment problem in Workshop Scheduling. 12th IFAC Symposium on Information Control problems in Manufacturing (INCOM'06), May 2006, ST ÉTIENNE, France. Vol 3, pp.107-112 - **2006**
45. Mustapha Cheurfa, Pierre Baptiste, Jean Pierre Campagne, Frédéric Grimaud. Prise en compte des Ressources Humaines en Ordonnancement : Application à l'Ordonnancement Cyclique. Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA 2004), Nov 2004, Douz, Tunisia - **2004**
46. Alexandre Dolgui, Anatoly Pashkevich, M. Pashkevich, Frédéric Grimaud. Forecasting risk analysis for supply chains with intermittent demand. International Workshop Performance and Risk Measurement : Operations, Logistics and Supply Chains, Dec 2004, Milan, Italy. p. 339-348 - **2004**
47. Mustapha Cheurfa, Pierre Baptiste, Jean Pierre Campagne, Frédéric Grimaud. Affectation du Personnel en Ordonnancement Cyclique : Cas de Réaffectation en Fin de Tâche. Cinquième Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'04, Sep 2004, Nantes, France - **2004**
48. Jean-Pierre Campagne, Frédéric Grimaud, Amel Mabed. Pilotage de systèmes de production cycliques : Proposition d'une infrastructure de gestion. GI 2001 : 4ème congrès international de génie industriel, Juin 2001, Marseille. Pp. 1083-1094 - **2001**
49. Jean-Pierre CAMPAGNE, Frédéric GRIMAUD, Saliha HACID, Production cyclique : Application et evaluation par simulation chez un équipementier automobile, Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'01, Avril 2001, Troyes - **2001**
50. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Jean-Pierre Campagne. MAMA-S: phase de spécification d'un modèle de simulation pour un système industriel distribué. MOSIM '01 : conference francophone de modélisation et simulation No3, Apr 2001, Troyes, France - **2001**
51. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Jean-Pierre Campagne. How to specify an simulation model of an industrial system in MaMA-S. 15th European Simulation Multiconferences - Modelling and Simulation (ESM 2001), Jun 2001, Prague, Czech Republic. pp. 296-305 - **2001**

52. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean Pierre Campagne. Méthodologie pour la simulation de systèmes industriels complexes distribués au travers d'une étude de cas. 4ème Conférence Internationale de Génie Industriel, Jun 2001, Aix-Marseille-Ajaccio, France - **2001**
53. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean-Pierre Campagne. A Study Case with a Methodological Approach for Complex and Distributed Industrial System Simulation. International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM 2001), 2001, Québec, Canada - **2001**
54. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Jean-Pierre Campagne. Methodological Approach for Distributed Simulation: General Concepts for MaMA-S. European Simulation Multiconference - Simulation and Modelling: Enablers for a better quality of life, 2000, Ghent, Belgium. pp. 77-82 - **2000**
55. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Jean-Pierre Campagne. Multi-agent architecture for distributed simulation : Teaching application for industrial management. European Simulation Multiconference - Simulation and Modelling: Enablers for a better quality of life, 2000, Ghent, Belgium. pp. 77-82 - **2000**
56. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean-Pierre Campagne. Multi-Agent Methodological Approach for Distributed Simulation. 11th European Simulation Symposium, 1999, Erlangen, Germany. pp. 104-108 - **1999**

#### **4. COMMUNICATION DANS DES WORKSHOP**

---

57. Stéphanie Bayard, Frédéric Grimaud, Xavier Delorme. Présentation ESCAPADD. *Forum SPACE*, Dec. 2019, Toulouse, France - **2019**
58. Mehdi LAMIRI, Xiaolan XIE, Alexandre DOLGUI et Frédéric GRIMAUD, « Modèle stochastique pour la planification des salles opératoires avec prise en compte de l'urgence », GdR MACS, Journée du groupe GISEH, 3 février 2006 - **2006**
59. Mehdi LAMIRI, Xiaolan XIE, Alexandre DOLGUI and Frédéric GRIMAUD, "A stochastic model for operating rooms planning with elective and emergency surgery demands," The EURO Working Group on Operational Research Applied to Health Services, Southampton, UK – **2005**
60. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud. Multi-Agent Methodological Approach for Distributed Simulation: Life Cycle of MaMA-S. ASIM-Workshop 20/21.3 - Multiagentsystems and Individual-based simulation, 2000, Wuerzburg, Germany. pp. 83-93 - **2000**
61. Frédéric GRIMAUD & al. Teaching 'production management' using software based on simulation models, ARENASPHERE'98, Pittsburgh, USA, May 31-June 3 - **1998**

## SELECTION DE 5 PUBLICATIONS

1. Przemyslaw Korytkowski, Frédéric Grimaud, Alexandre Dolgui. Exponential smoothing for multi-product lot-sizing with heijunka and varying demand. *Management and Production Engineering Review*, 2014, Volume 5 (Number 2), pp. 20-26.

Here we discuss a multi-product lot-sizing problem for a job shop controlled with a heijunka box. Demand is considered as a random variable with constant variation which must be absorbed somehow by the manufacturing system, either by increased inventory or by flexibility in the production. When a heijunka concept (production leveling) is used, fluctuations in customer orders are not transferred directly to the manufacturing system allowing for a smoother production and better production capacity utilization. The problem rather is to determine a tradeoff between the variability in the production line capacity requirement and the inventory level.

KEYWORDS : Job shop, multi-product, varying demand, lot-sizing, heijunka. exponential smoothing

2. Kseniya Schemelewa, Xavier Delorme, Alexandre Dolgui, Frédéric Grimaud. Multi-product sequencing and lot-sizing under uncertainties: A memetic algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, International Federation of Automatic Control, 2012, Volume 25 (Issue 8), pp.Pages 1598-1610.

The paper deals with a stochastic multi-product sequencing and lot-sizing problem for a line that produces items in lots. Two types of uncertainties are considered: random lead time induced by machine breakdowns and random yield to take into account part rejects. In addition, sequence dependent setup times are also included. This study focuses on maximizing the probability of producing a required quantity of items of each type for a given finite planning horizon. A decomposition approach is used to separate sequencing and lot-sizing algorithms. Previous works have shown that the sequencing sub-problem can be solved efficiently, but the lot-sizing sub-problem remains difficult. In this paper, a memetic algorithm is proposed for this second sub-problem. Computational results show that the algorithms developed can be efficiently used for large scale industrial instances.

KEYWORDS : Lot-sizing Sequencing Random lead time Random yield Optimization Memetic algorithm

3. Mohand Essaid, Frédéric Grimaud, Patrick Burlat. Manufacturing network simulation using a data-driven model. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, Inderscience, 2011, Vol. 6 (No.3), pp. 228 - 237.

The globalization of markets and world-wide competition forces manufacturing enterprises to enter into alliances leading to the creation of distributed manufacturing enterprises. Before forming a partnership it is essential to evaluate viability of proposed manufacturing network. Simulation provides an attractive tool to make decisions on such situations. However, due to its complexity and high cost

and time consumption, simulation failed to gain a wide acceptance from industrial users. This paper presents a generic simulation model which attempt to create reusable enterprises modules for evaluating supply chain performance. The simulation is developed using ARENA software, it is coupled with spreadsheet configuration tool. The latter permits a data driven approach for simulation instances creation. Manufacturing layout type, demand response strategy, production management policy and manufacturing effectiveness level are the constituents of the model instantiation. These aspects constitute a manufacturing library from which various configurations of supply chain can be implemented and simulated. The tool is tested in a make to stock environment to evaluate supply chain configurations when enterprises of different effectiveness levels and management policies are cooperating.

KEYWORDS : manufacturing network, simulation, enterprise effectiveness

4. Mehdi Lamiri, Frédéric Grimaud, Xiaolan Xie. Optimization methods for a stochastic surgery planning problem. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, 2009, 120 (2), pp.Pages 400-410.

The purpose of this paper is to propose and compare several optimization methods for elective surgery planning when operating room (OR) capacity is shared by elective and emergency surgery. The planning problem is considered as a stochastic optimization problem in order to minimize expected overtime costs and patients' related costs. An "almost" exact method combining Monte Carlo simulation and mixed integer programming is presented, and its convergence properties are investigated. Several heuristic and meta-heuristic methods are then proposed. Numerical experimentations are conducted to compare the performance of different optimization methods

KEYWORDS : Operating room, Surgery planning, Emergency, Stochastic programming, Monte Carlo simulation, Heuristics

5. Stéphane Galland, Frédéric Grimaud, Philippe Beaune, Jean-Pierre Campagne. MaMA-S : An introduction to a methodological approach for the simulation of distributed industrial systems. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, 2003, 85 (1), pp. 11-31.

We are located in the context of the industrial system simulation, which is complex and distributed in operational, informational and decisional terms. In this article, we present the problems of the simulation of such systems. We propose a methodological approach based on the systemic and on the multi-agent concepts. It authorizes the data-processing and modeling distributions.

KEYWORDS : Industrial system simulation; Multi-agent systems; Methodology; Distribution; Decisional processes

L'ensemble de ces publications est disponible en annexe de ce mémoire.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[ALC'ACER et al. 2019] Alc'acer, V., and V. Cruz-Machado. 2019, jun. "Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems". *Engineering Science and Technology, an International Journal* 22(3):899–919.

[AIF 2016] Alliance Industrie du Futur, Rapport Annuel 2016. <https://tinyurl.com/ycnwsqxe>.

[ANR 2017] Agence Nationale de la Recherche, Plan d'action 2017. <https://tinyurl.com/jslhdu>.

[BAGHERI et al. 2015] Bagheri, B., S. Yang, H.-A. Kao, and J. Lee. 2015. "Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware machines in Industry 4.0 Environment". *IFAC-PapersOnLine* 48(3):1622–1627.

[BANKS 1999] Banks, J., 1999. Introduction to simulation. In: *Winter Simulation Conference*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 7–13.

[BAUTERS et al. 2018] Bauters K., Cottyn J., Claeys D., Slembrouck M., Veelaert P., Van Landeghem H. Automated work cycle classification and performance measurement for manual work stations, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Volume 51, June 2018, Pages 139-157

[BLUA et al. 2019] Blua Ph., Yalaoui F., Amodeo L., De Block M., Laplanche D. *Logistique hospitalière et e-gouvernance: Transition et révolution numérique*, ISTE Group 2019

[BOER et al. 2007] C.R.Boër, S.Dulio, *Mass Customization and Footwear*. In *Mass Customization and Footwear : Myth, Salvation or Reality ?*, 5–65, Springer, London, 2007.

[CARDIN et al. 2019] Cardin O., Castagna P., Couedel D., Plot C., Launay J., Allanic Y., Jegou S., *Energy-aware resources in Digital Twin: the case of injection molding machines*. SOHOMA 2019., 853, Springer Cham, pp.183-194, 2019, *Studies in Computational Intelligence*,

[DATTA 2016] S.Datta, *Emergence of Digital Twins*. *Computing Research Repository*, abs/1610.06467: 1–13, 2016.

[DELORME et al. 2009] X.Delorme, X.Gandibleux, J.Rodriguez, *Stability evaluation of a railway timetable at station level*. *European Journal of Operational Research*, 195(3): 780–790, 2009.

[DOLGUI et al. 2005] Dolgui, A., Levin, G., and Louly, M. (2005). Decomposition approach for a problem of lot-sizing and sequencing under uncertainties. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(5), 376-385.

[DOUMEINGTS et al. 1993] Doumeingts, G., D. Chen, B. Vallespir, P. Fénié, and F. Marcotte. 1993. "GIM (GRAI Integrated Methodology) and its Evolutions - A Methodology to Design and Specify Advanced Manufacturing Systems". In *DIISM*. Langmann, R., and L. F. Rojas-Pena. 2016, feb. "A PLC as an Industry

4.0 component". In 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV): IEEE.

[DORISON 2009] Alain Dorison, Rapport sur l'enseignement de l'excellence opérationnelle dans les grandes écoles d'ingénieurs et de management, Juin 2009,

[EFFRA 2020] European Factory of the Future Research Association (EFFRA), Factories of the Future - Multi-annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020. <https://tinyurl.com/y9476woj>.

[FERBER 1995] Ferber J., 1995. *Les Systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective*. InterEditions. Paris, France.

[FILHO 2012] Moacir Godinho Filho, From time-based competition (TBC) to quick response manufacturing (QRM): The evolution of research aimed at lead time reduction, International Journal of Advanced Manufacturing Technology · February 2012

[CHEN et al. 1996] Chen, D., and G. Doumeingts. 1996. "The GRAI-GIM reference model, architecture and methodology". In IFIP Advances in Information and Communication Technology, 102–126. Springer US.

[DACLIN et al. 2016] [20] N.Daclin, S.Mallek, V.Chapurlat, B.Vallespir, Writing and verifying interoperability requirements : Application to collaborative processes. Computers in Industry, 82: 1–18, 2016.

[DETTY et al. 2000] [28] R.B.Detty, J.C.Yingling, Quantifying benefits of conversion to lean manufacturing with discrete event simulation : a case study. International Journal of Production Research, 38(2): 429–445, 2000.

[GILCHRIST 2016] [4] A.Gilchrist, Introducing Industry 4.0. In Industry 4.0, 195–215, Apress, Berkeley, CA, 2016.

[GOURGAND et al. 1992] Gourgand M. et Kellert, P. An object-oriented methodology for manufacturing system modelling. Summer, Computer Simulation Conference: 1123–1128. Reno, Nevada, USA, 27-30 juillet 1992.

[GOURGAND et al. 2008] Gourgand, M., et Rodier, S. A Decision-Making Aid Tool for an Operating Theatre Suite Sizing and Planning. International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain(ILS): 309-320. Madisson, USA, 27-30 mai 2008.

[HANI et AL 2008] Hani Y., Amodeo L., Yalaoui F., Chen H. Simulation based optimization of a train maintenance facility, Journal of Intelligent Manufacturing, Volume 19 Numéro 3 Pages 293-300, Springer US

[KOREN 2010] Koren, Yoram., 2010. The global manufacturing revolution : product-process-business integration and reconfigurable systems. Wiley, Hoboken.

[KRITZINGER et AL 2018] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W.: Digital Twin in manufacturing. A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine (2018).

[IMT 2017] [Institut Mines Télécom, Industrie du Futur. <https://tinyurl.com/y7w3mfea>.

[LAMECHE et AL 2017] Lameche K., Naijd N.M., Castagna P., Kouiss K. Modularity in the design of reconfigurable manufacturing 20th IFAC World Congress, Volume 50, Issue 1, Pages 3511-3516 (July 2017)

[LAW et al. 1999] [26] A.M.Law, W.D.Kelton, Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill Higher Education, 1999

[LE MOIGNE 1992] Le Moigne J.L., 1992. *La modélisation des systèmes complexes*. Editions Dunod, Paris, France.

[LIAN et al. 2007] Y.-H. Lian & H. Van Landeghem. Analysing the effects of Lean manufacturing using a value stream mapping-based simulation generator, International Journal of Production Research, 45:13, 3037-3058, 2007

[MARCON et al. 2003] Marcon, E., Kharraja, S., Simmonet, G., 2003. The operating theatre scheduling: An approach centered on the follow-up of the risk of no realization of the planning. International Journal of Production Economics 85 (1), 83–90.

[MARQUES et AL 2010] Guillaume Marquès, Caroline Thierry, Jacques Lamothe & Didier Gourc (2010) A review of Vendor Managed Inventory (VMI): from concept to processes, Production Planning & Control, 21:6, 547-561

[MARQUES et al. 2012] G.Marquès, J.Lamothe, C.Thierry, D.Gourc, A supply chain performance analysis of a pull inspired supply strategy faced to demand uncertainties. Journal of Intelligent Manufacturing, 23(1): 91–108, 2012.

[MCCORMICK 1994] McCormick S.T., Rao U.S., « Some complexity results in cyclic scheduling », Math Comput. Modelling, vol 20, 1994, p. 107-122

[MCCULLEN et al. 2015] McCullen, P., Eagle, S., 2015. Demand-driven innovation in material planning and control: a review of early implementations, in: Reflections on Supply Chain Research and Practice. Proceedings of 20th International Symposium on Logistics, Bologna,

[MICLO 2016] Miclo, R., 2016. Challenging the "Demand Driven MRP" Promises : a Discrete Event Simulation Approach, Ph.D. thesis of Toulouse University, France.

[MILLET et al. 2013] Millet, P.-A., L. Trilling, T. Moyaux, and O. Sakka. 2013, mar. "Ontology of SCOR for the Strategic Alignment of Organizations and Information Systems". In Supply Chain Performance, 171–210. John Wiley & Sons, Inc.

[MORENO 1999] L. Moreno, R.M. Aguilar, C.A. Martin, J.D. Pineiro, J.I. Estevez, J.F. Sigut, J.L. Sanchez and V.I. Jimenez, "Patient-centered simulation tool for aiding in hospital management", *Simulation Practice and Theory*, vol. 7, 1999, pp 373-393.

[NEGAHBAN et al. 2014] Negahban, A., and J. S. Smith. 2014, apr. "Simulation for manufacturing system design and operation: literature review and analysis". *Journal of Manufacturing Systems* 33(2):241–261.

[OHNO 1989] Ohno, T., 1989. *L'esprit Toyota, Productivité de l'entreprise*. Masson, Paris, Milan, Barcelone

[ORLICKY 1975] Orlicky, J., 1975. *Material requirements planning: the new way of life in production and inventory management*. McGraw-Hill, New York.

[PISCHING et al. 2018] Pisching, M. A., M. A. Pessoa, F. Junqueira, D. J. dos Santos Filho, and P. E. Miyagi. 2018, nov. "An architecture based on RAMI 4.0 to discover equipment to process operations required by products". *Computers & Industrial Engineering* 125:574–591.

[PTAK et al. 2018a] Ptak, C., Smith, C., 2018a. *The Demand Driven Adaptive Enterprise Surviving, Adapting, and Thriving in a VUCA World*, Industrial Press, Inc. ed.

[PTAK et al. 2018b] Ptak, C., Smith, C., 2018b. *Demand Driven Material Requirement Planning*, 2nd ed. Industrial Press, Inc.

[ROSEN et al. 2015] R.Rosen, G.von Wichert, G.Lo, K.D.Bettenhausen, About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3): 567–572, 2015.

[RYAN et al. 2006] Ryan, J., and C. Heavey. 2006, jun. "Process modeling for simulation". *Computers in Industry* 57(5):437–450.

[SCHLEICH et al. 2017] B.Schleich, N.Anwer, L.Mathieu, S.Wartzack, Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66: 141–144, 2017.

[SCHROER 2004] [27] B.J.Schroer, Simulation as a Tool in Understanding the Concepts of Lean Manufacturing. *Simulation*, 80(3): 171–175, 2004.

[SHOFA et al. 2017] Shofa, M.J., Widyarto, W.O., 2017. Effective production control in an automotive industry: MRP vs. demand-driven MRP. Presented at the Green process, material, and energy: a sustainable solution for climate change: Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering, Technology, and Industrial Application (ICETIA 2016), Surakarta, Indonesia,

[SIMCHI-LEVI et al. 2000] Simchi-Levi D., Kaminsky P., and Simchi-Levi E., 2000 *Designing and managing the supply chain : concepts, strategies and cases studies*. Irwin McGraw- Hill.USA.

[SMARTFACTORYKL 2017] [3] SmartFactoryKL, SmartFactoryKL - Welcome to the future of industrial production. <https://tinyurl.com/y8enawjt>.

[SMITH 2014] Smith, D., Smith, C., 2014. Demand driven performance: using smart metrics. McGraw-Hill Education, New York.

[TANNOCK et al. 2007] Tannock J, Cao B, Farr R and Byrne M (2007). Data-driven simulation of the supply-chain-Insights from the aerospace sector. *International Journal of Production Economics*. pp.70–84

[TREFOND 2014] S. Tréfond. Planification robuste du matériel roulant ferroviaire. Thèse de doctorat. Conservatoire National des Arts et Métiers, 2014.

[UHLEMANN et ALL 2017 a] T.H.J.Uhlemann, C.Lehmann, R.Steinhilper, The Digital Twin : Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 61: 335–340, 2017.

[UHLEMANN et AL 2017 b] T.H.J.Uhlemann, C.Schock, C.Lehmann, S.Freiburger, R.Steinhilper, The Digital Twin : Demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *Procedia Manufacturing*, 9: 113–120, 2017.

[USUGA CADAVID et AL 2019] Usuga Cavadid J.P., Lamouri S., Grabot B., Fortin A. Machine Learning in Production Planning and Control: A Review of Empirical Literature. 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019: Berlin, Germany, 28–30 August 2019 Volume 52, Issue 13, 2019, Pages 385-390

[VALENCIA et AL 2019] Valencia E., Lamouri S., Pellerin R., Dubois P., Moeuf E., Production Planning in the Fourth Industrial Revolution: A Literature Review, 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019: Berlin, Germany, 28–30 August 2019, Volume 52, Issue 13, 2019, Pages 2158-2163

[VERNADAT 1998] Vernadat, F. 1998. "The CIMOSA Languages". In *Handbook on Architectures of Information Systems*, 251–272. Springer Berlin Heidelberg.

[VERNADAT 2001] Vernadat, F., UEML: Towards a unified entreprise modelling language. In: 3<sup>eme</sup> Conference Francophone de MOdélisation et de SIMulation, 2001, Vol. 1, Troyes, France, pp. 3–10.

[VERDANAT 2014] Vernadat, F. "Enterprise Modeling in the context of Enterprise Engineering: State of the art and outlook". *International Journal of Production Management and Engineering* 2(2):57, 2014



---

## ANNEXE 1 : SELECTION DE 5 PUBLICATIONS

---



# EXPONENTIAL SMOOTHING FOR MULTI-PRODUCT LOT-SIZING WITH HEIJUNKA AND VARYING DEMAND

Przemysław Korytkowski<sup>1</sup>, Frédéric Grimaud<sup>2</sup>, Alexandre Dolgui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Faculty of Computer Science, Poland

<sup>2</sup> Ecole des Mines de Saint-Etienne, LIMOS UMR CNRS 6158, France

## Corresponding author:

Przemysław Korytkowski

West Pomeranian University of Technology in Szczecin

Faculty of Computer Science

Zolnierska 49, 71-210 Szczecin, Poland

phone: +48 91 449-55-94

e-mail: pkorytkowski@zut.edu.pl

Received: 15 January 2014

Accepted: 20 April 2014

## ABSTRACT

Here we discuss a multi-product lot-sizing problem for a job shop controlled with a heijunka box. Demand is considered as a random variable with constant variation which must be absorbed somehow by the manufacturing system, either by increased inventory or by flexibility in the production. When a heijunka concept (production leveling) is used, fluctuations in customer orders are not transferred directly to the manufacturing system allowing for a smoother production and better production capacity utilization. The problem rather is to determine a tradeoff between the variability in the production line capacity requirement and the inventory level.

## KEYWORDS

Job shop, multi-product, varying demand, lot-sizing, heijunka, exponential smoothing.

## Introduction

This paper is devoted to the topic of production lot-sizing for the case of uncertain but stationary demand. The demand is defined as a random variable with an estimated mean value and variation. Mean value and standard deviation do not shift over time, meaning no seasonal cycles or trend are considered. Demand fluctuations can be absorbed with an increased inventory level or by adding capacity flexibility in the production system [1]. Fluctuations in demand are often highly amplified and delayed throughout the production system, and can result in increased overtime or idle time [2–3]. Increased inventory levels decouple the production system from demand allowing production to stabilize at a fixed level. This approach is traditional and was the most popular some time ago. Increased inventories lead to the elongation of cycle times, increases in the size of production batches and reductions in flexibility [4]. On the other hand, demand fluctuations could be passed directly to the production system, which

must then be flexible enough to meet customer requirements. In this case, production is organized in a make-to-order manner and in extreme case no inventory of finished products is required. This creates variable production schedules, which can be stressful and can lead to mistakes. Cycle time is short as finished products are transferred directly to the customer [5]. Usually it's very hard or even impossible to organize a production system that is completely flexible, as often this flexibility requires working overtime with an additional workforce and machining equipment. Thus an intermediate solution is required [6], a sort of compromise or tradeoff between inventory levels and flexibility.

Heijunka in recent years has gained popularity as a lean management tool for smoothing production, and as a result better control of the inventory of finished products [7]. The objective of heijunka is to avoid peaks and valleys in the production schedule.

In the case where demand is uncertain, two approaches are possible: demand leveling and production leveling. Demand leveling is the role of market-

ing and sales departments, while production leveling is done by the manufacturing department [7].

Let's focus here on production leveling, which in Japanese is called heijunka, a distribution of production volume and mix evenly over time [4]. Heijunka is a core concept that helps bring stability to a manufacturing process by converting uneven customer demand into an even and predictable manufacturing process. Heijunka is a form of cyclic scheduling. The cyclic schedules offers advantages both for shop floor activities and for planning. It may help to detect disturbances earlier and reduce set up time and costs [8].

Heijunka requires that the company has already introduced other lean management tools, such as: takt time, kanban planning, SMED (reduction of changeover and set-up times).

Introducing heijunka requires the determination of a base period called the EPEI (Every Part Every Interval) [6]. During the base period the whole mix of products has to be produced.

In literature, it has been demonstrated that Heijunka improves operational efficiency in several objectives related to flexibility, speed, cost, quality and level of customer service.

It is crucial to realize that a heijunka is the establishment of a finished goods inventory buffer that absorbs fluctuations in demand [9]. Although this may initially increase inventory, it is essential in creating stability on the shop floor. This stability enables a greater focus on the reduction of changeover times, which in turn lead to the reduction of batch sizes and inventory.

The goal of this study is to develop a model of lot-sizing for a production system controlled with a heijunka box under varying demand.

This paper is further organized as follows. The following Sec. 2 presents a literature review. The subsequent Sec. 3 describes a model statement followed then by a case study 4. Section 5 presents an analysis of the results. The final Sec. 6 concludes the paper with a summary and some perspectives.

## Literature review

Heijunka is a concept developed by Toyota [7] for the automotive industry. The concept is widely universal and by now has been implemented in many different manufacturing environments, even in process industries [9] and [10]. A case study from a semi-process industry [10] has shown that heijunka (termed cyclical scheduling) helped to realize regularity in the continuous part of production. Its simplicity enabled coordination of the planning and con-

rol processes with the production processes. The positive effects realized through the application of heijunka included [9]: improved coordination across the entire value-stream, and the potential for reduced changeover times leading to reduced batch sizes and increased throughput.

Heijunka and Just in Sequence (JIS) were compared in a case study of BMW engine production [11]. Results from this study showed that heijunka outperformed JIS when used to smooth out the most extreme production values, with the remainder of production carried out with JIS.

Abdulmalek and Rajgopal [12] demonstrated a steel industry use of heijunka as one component of a lean transformation, together with: value stream mapping, SMED, 5S, JIT, TPM, cellular manufacturing.

Matzka et al. [13] modeled a heijunka-controlled kanban manufacturing system as a queuing network with synchronization stations in order to find optimal buffer capacities. Processing times were considered to be constant. The arriving demands were controlled and limited by a kanban loop.

A simulation based comparative study of kanban and heijunka controlled production systems was presented by Runkler [14] for an electronic circuit manufacturer. Heijunka was preferable in stable environments with demand and servicing rate history because then it yielded lower buffer levels and a higher average ability to deliver than Kanban.

A procedure for leveling low volume and high mix production was developed in [15]. Clustering techniques were used to subsume the large number of product types into a manageable number of product families. Production leveling was realized by scheduling actual production orders into the leveling pattern. The pattern is determined and kept constant for a defined period of time. In the case of deviations resulting from significant changes in product mix and/or customer demand, the leveling pattern needed to be adapted.

In this paper, we have developed an alternative approach to leveling: a smooth adjusting leveling pattern for every time period depending on inventory levels for all final products. Demand is known only for the forthcoming period, under the assumption that mean value of demand and the variation over a longer time remain unchanged.

## Heijunka controlled production

Let's analyze the typical production system controlled by a heijunka and presented in Fig. 1. Demand is fulfilled from a supermarket. The term

supermarket is from lean management vocabulary where it means an inventory with defined physical positions and volume for each type of product. The demand is not fulfilled directly from production but instead finished products are taken from the supermarket that is supplied by production. This is quite similar to a make-to-stock policy. Information about the products taken is transferred to a heijunka box. The heijunka box is another concept from lean management. It is a cyclical schedule which is divided into a grid of boxes. The columns represent a specific period of time. Rows represent the product types produced by the subsequent production. This type of organization is in-between make-to-stock and make-to-order. It is not a make-to-stock as production is not completely separated from demand and production lots are unequal to orders. It is also not make-to-order as demand is fulfilled instantly from the supermarket as long there is a sufficient inventory level. In the case of an inventory shortage the remaining part of demand is backordered and will be supplemented in the forthcoming period. The assumption is that the entire demand is realized and nothing is lost due to inventory shortages.

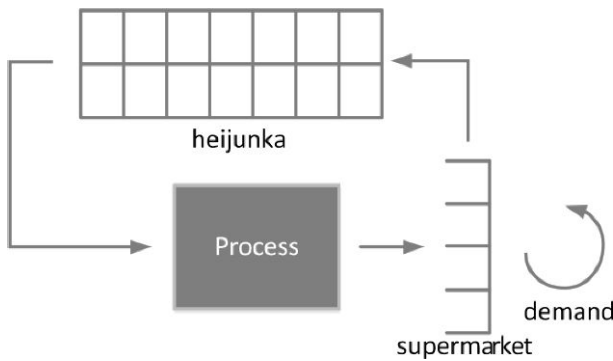


Fig. 1. Heijunka controlled production system.

An important notion closely related with heijunka is EPEI, i.e. Every Part Every Interval. EPEI defines the time interval during which every type of product has to be manufactured. EPEI is reflected in days or hours. From a lean management point of view, the shorter the EPEI, the better. A short EPEI means that changeover times were reduced and inventory levels could be decreased. EPEI is calculated by dividing the sum of changeover times for each product by the available time for changeovers per period.

Heijunka has gained attention in industry because in combination with other lean tools like SMED, it provides the methodology for efficient changeover in the manufacturing process. It allows producing in small batches, keeping low inventory

levels and short production cycles. Usually EPEI is calculated and based on fixed lot-sizes for all products. Unless something happens, like changing of proportion or higher or lower demand, the lot-size stays unaffected. This approach works under the assumption that demand variation can be completely absorbed from the inventory. Otherwise a lot of backlogging emerges. The adaptive lot-sizing approach presented below is intended to capture part of the demand fluctuation in order to decrease inventory levels.

### Model statement

Let us consider a forecast of demand  $d_i$  over the horizon  $N$ . The goal is to choose  $q_i$ , the quantities to be manufactured in period  $i$ , so as to satisfy all demands at minimal costs on one hand, and not to translate external fluctuations into internal production process on the other. Demand is met from a supermarket of capacity  $C_j$  for type  $j$  product. Total supermarket capacity is  $\sum_{j=1}^P C_j$  and at any time the inventory level could not exceed the supermarket capacity for each type of product

$$\bigvee_j I_j \leq C_j. \quad (1)$$

EPEI is the period for producing every type of product, i.e. total available production time

$$EPEI = \frac{\sum_{j=1}^P S_j}{T - \sum_{j=1}^P avg(d_j) \cdot t_j}, \quad (2)$$

where  $S_j$  is the setup time for product  $j$  and  $T$  is the gross available time for production,  $avg(d_j)$  is the historical average demand for product  $j$ .

Net production time  $R$  is equal to total production time minus the sum of changeover times for all products,

$$R = T - \sum_{j=1}^P S_j. \quad (3)$$

Thus sum of quantities  $q_{ij}$  produced in any time period multiplied by the manufacturing time for each product type have to be smaller or equal to  $R$

$$\bigvee_i \left( R \geq \sum_{j=1}^P q_{ij} \cdot t_j \right). \quad (4)$$

In the case demand could not be fulfilled, a backlog occurs, to be satisfied in the following period:

$$b_{ij} = \max(d_{ij} + b_{i-1,j} - I_j; 0). \quad (5)$$

Quantities to be manufactured are calculated using exponential smoothing, known as the Holt model [16], as a technique to reduce variability in production lot-sizes.

$$q_{ij}^* = \alpha \cdot (C_j - I_j) + (1 - \alpha) \cdot q_{i-1,j}, \quad (6)$$

where  $\alpha \in (0, 1)$  is a smoothing factor.  $\alpha$  decides how important history is ( $q$  from the previous time period). The smaller the value  $\alpha$ , the more history plays an important role.

In order to satisfy Eq. (4), to not exceed production capacity, the quantities to be manufactured have to be normalized:

$$q_{ij} = q_{ij}^* \cdot R / \sum_{j=1}^P q_{ij}^* \cdot t_j. \quad (7)$$

A list of all parameters is presented in Table 1.

Table 1  
Notation.

$i$ – time period index $i = 0, 1, 2, \dots, N$
$j$ – product index $j = 1, 2, 3, \dots, P$
$d_{ij}$ – number of products $j$ demanded in period $i$
$N$ – number of time periods
$P$ – number of product types
$q_{ij}$ – quantities of product $j$ to be manufactured in period $i$
$C_j$ – supermarket capacity for product $j$
$S_j$ – setup time for product $j$
$I_{ij}$ – inventory in units of product $j$ at the end of period $i$
$b_{ij}$ – backlog in units of product $j$ at the end of period $i$
$EPEI$ – period for producing every type of product
$T$ – gross available time for production
$R$ – net production time available for one EPEI period
$t_j$ – production time of product $j$

The above-presented model is represented by an algorithm (Table 2) which calculates  $q_{ij}$  and  $b_{ij}$ . Firstly, input variables have to be initialized. The initial quantity of products to be manufactured  $q_{0j}$  is set to an averaged historical demand; initial backlog  $b_{0j}$  is set to 0 and inventory  $I_j$  to the maximum capacity  $C_j$ . The main loop (lines 8–27) runs over time index  $i$ , the inner loop (lines 9–21) runs over product index  $j$ . In line 10, the inventory is replenished by the quantity manufactured during the previous period. If the inventory is not sufficient to cover demand then the remaining part creates a backlog (lines 11–12). Quantities to be manufactured during the current period are calculated in lines 18 and 19 using Holt’s exponential smoothing. Finally adjustments are done in lines 22–26 to assure that the production capacity could meet all manufacturing requests.

Table 2  
Lot-sizing algorithm.

```
//initialization
1 get N, P, alpha
2 For j = 1 To P
3   get d(.,j), C(j), t(j)
4   b(0,j)=0
5   I(j)=C(j)
6   q(0,j)=avg(d(.,j))
7 Next j
//main loop
8 For i=1 To N
9   For j=1 To P
10    I(j)=I(j)+q(i-1,j)
11    If d(i,j)+b(i-1,j) > I(j) Then
12      b(i,j)=d(i,j)+b(i-1,j)-I(j)
13      I(j)=0
14    Else
15      b(i,j)=0
16      I(j)=I(j)-d(i,j)
17    End If
18    q(i,j)=alpha*(C(j)-I(j))+
19      +(1-alpha)*q(i-1,j)
20    sumQ=sumQ+q(i,j)*t(j)
21 Next j
//adjustment
22 If sum > R Then
23   For j=1 To P
24     q(i,j)=q(i,j)*R/sumQ
25   Next j
26 End If
27 Next i
```

### Illustrative example

Let’s analyze the proprieties of the lot-sizing algorithm presented in the previous section. We use a simple example of a pull production system with a supermarket of finished products and a heijunka box (see Fig. 1). Let’s assume that three types of final products are manufactured: A, B and C. The historic average weekly demand is 450, 270 and 180 respectively for products A, B and C. Production time  $t$  is 2 min, 3 min and 1 min respectively for products A, B and C. Number of time periods  $N$  is 200. Parameters are presented in Table 3.

Table 3  
Parameters.

Parameters	A	B	C
avg( $d$ )	450	270	180
$C$	900	540	360
$I$ at time = 0	450	270	180
$t$	2 min	3 min	1 min
$S$	50 min	30 min	20 min
d:case 1	N(450,22.5)	N(270,18.5)	N(180,9)
d:case 2	N(450,45)	N(270,27)	N(180,18)
d:case 3	N(450,90)	N(270,54)	N(180,36)

Customer demand is fulfilled from supermarket in equal length cycles. If in a particular cycle a demand could not be met by the amount of products available in the supermarket ( $d_{ij} > I_j$ ), the unfulfilled demand is backordered ( $b_{ij}$ ) on the next cycle until it is satisfied.

In every cycle all types of products are manufactured. This is assured by the heijunka box. The heijunka box is thus divided into 3 slots, one for each final product. Production lot-size, i.e. quantity of product to be manufactured in a heijunka slot is determined by the proposed algorithm (Table 2), with the restriction that the total amount of time necessary for production could not exceed the net available working time per cycle.

The time period is one week. EPEI is equal to 1 what means that every type of product is manufactured during a week period. The results presented below can be easily extended to the case when EPEI creates shorter cyclic schedules. In this case, demand will be divided into smaller chunks and the manufacturing system will supply the inventory more often too.

To illustrate advantages of the proposed lot-sizing algorithm an experimental design was proposed.

First, we wanted to examine how it behaved with various levels of demand fluctuation. We have randomly generated three test cases drawn from a normal distribution with the means presented in Table 3, and standard deviations of 5%, 10% and 20% of the mean value. For all three cases we tested  $\alpha$  parameter at 5 levels: 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 and 1.

Figures 2 and 3 present demand and quantities to be manufactured for 10% and 20% standard deviations from mean values. One can observe in both cases with exponential smoothing that quantities to be manufactured, especially when  $\alpha = 0.1$ , have smaller changeability. This is also shown in Table 5.

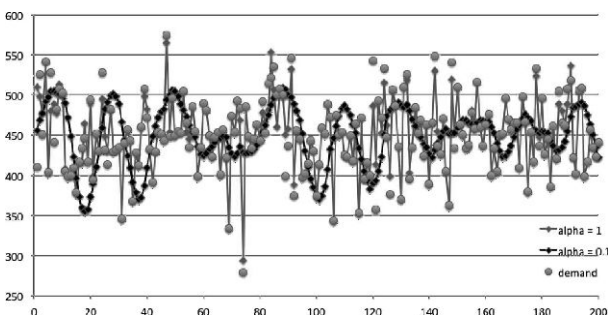


Fig. 2. Quantities to be manufactured with demand at 10%.

Table 4 presents differences (deltas) between two consecutive quantities to be manufactured for all products together, with the same differences for the

original demand. The deltas of quantities to be manufactured are 6–7 times smaller on average than the delta for demand. This shows that the developed algorithm fulfills its role and avoids passing demand fluctuations to the manufacturing process.

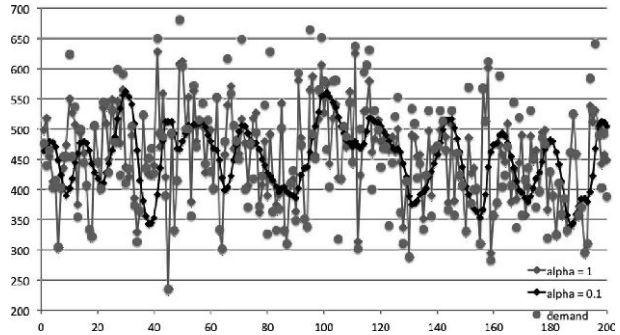


Fig. 3. Quantities to be manufactured with demand at 20%.

Table 4  
Changes of quantity to be manufactured.

SD	alpha		delta Q A	delta Q B	delta Q C	delta D A	delta D B	delta D C
		avg						
5%	0.1	avg	4	3	2	25	22	11
		max	13	12	6	98	72	32
	0.2	avg	5	5	2			
		max	18	18	8			
	0.4	avg	8	8	4			
		max	28	34	13			
	0.6	avg	12	11	5			
		max	40	43	17			
	1	avg	24	21	11			
		max	98	72	32			
10%	0.1	avg	9	3	3	51	30	19
		max	28	13	9	206	104	82
	0.2	avg	10	6	4			
		max	32	21	15			
	0.4	avg	17	11	7			
		max	71	38	23			
	0.6	avg	24	15	10			
		max	126	47	41			
	1.0	avg	46	28	19			
		max	191	87	82			
20%	0.1	avg	14	8	7	101	61	38
		max	50	29	29	335	292	137
	0.2	avg	20	12	8			
		max	73	53	34			
	0.4	avg	33	19	13			
		max	142	83	54			
	0.6	avg	44	26	19			
		max	179	101	72			
	1.0	avg	76	47	37			
		max	311	163	129			

The resulting stability of production plans causes greater predictability of the process, reducing the number of errors, making it easier to plan staffing, maintenance, etc.

Table 5  
Average and standard deviation for quantities to be manufactured.

SD	alpha	Avg Q A	Avg Q B	Avg Q C	SD QA	SD Q B	SD Q C
5%	0.1	452	270	180	16	12	7
	0.2	452	270	180	15	13	6
	0.4	452	270	180	16	14	7
	0.6	452	270	180	17	15	7
	1	452	270	180	22	19	9
10%	0.1	450	270	180	35	14	13
	0.2	450	270	180	30	15	10
	0.4	450	270	180	32	18	11
	0.6	450	269	180	34	20	13
	1	450	270	180	43	24	17
20%	0.1	452	271	177	52	37	29
	0.2	453	271	177	55	38	24
	0.4	453	271	178	61	38	24
	0.6	452	271	178	65	40	26
	1	453	271	178	76	46	33

Table 6  
Average and standard deviation for inventory levels.

SD	alpha	Avg I A	Avg I B	Avg I C	Min I A	Min I B	Min I C
5%	0.1	547	330	220	439	209	151
	0.2	548	329	220	441	258	184
	0.4	548	329	220	441	266	190
	0.6	548	329	220	441	268	194
	1	548	329	220	441	272	194
10%	0.1	544	327	218	285	187	114
	0.2	547	328	218	369	227	164
	0.4	548	329	219	402	243	176
	0.6	548	329	219	423	251	173
	1	547	328	219	423	253	179
20%	0.1	508	305	211	98	0	0
	0.2	503	302	207	179	69	24
	0.4	507	304	207	151	142	48
	0.6	506	304	207	148	128	77
	1	504	303	207	153	129	74

At the same time for all cases, average quantities to be manufactured and inventories remain at the same level, as shown in Tables 5 and 6. When analyzing the results presented in Table 6, it is clear that when demand fluctuations are small, the inventory level can be kept low. Minimal inventory levels

are not much lower than average levels. In the case when demand variations are high and the smoothing coefficient  $\alpha = 0.1$ , minimal inventory levels fall down to 0, i.e. there were some shortages and a backlog appeared.

## Conclusions

This paper presents a novel approach to lot-sizing management for manufacturing systems controlled with a heijunka. Exponential smoothing allows the adjustment of quantities to be manufactured in an environment with fluctuating demand. As has been shown in the case study, demand fluctuations are not passed directly do the manufacturing system, taking away stress from production and simplifying shop floor management. Production planning becomes more predictable. At the same time inventory levels can be keep low in order to reduce storage costs.

The proposed approach is a compromise between flexibility and stability. Assignment of the smoothing parameter  $\alpha$  depends on the demand fluctuation and the readiness to backlog.

This work can be a starting point for optimization of production lot-sizing in regards to demand fluctuation, desired production system flexibility, inventory costs and backlog potential.

## References

- [1] Liker J.K., *The Toyota way, 14 management principles from the worlds greatest manufacturer*, 1st edn., New York: McGraw-Hill, 2004.
- [2] Dolgui A., Proth J.M., *Supply chain engineering: useful methods and techniques*, London: Springer, 2010.
- [3] Dolgui A., Proth J.M., *Les systèmes de production modernes*, 2 volumes, London: Hermès Sciences, 2006.
- [4] Dennis P., *Lean Production Simplified*, 2nd ed., Productivity Press, 2007.
- [5] Rother R., Harris M., *Creating continuous flow: An action guide for managers, engineers and production associates*, Lean Enterprise Institute (LEI), 2002.
- [6] Rother M., *Toyota Kata: Managing People for Continuous Improvement and Superior Results*, New York: McGraw-Hill, 2009.
- [7] Licker J.K., *Toyota fieldbook*, New York: McGraw-Hill, 2005.
- [8] Bocewicz G., Banaszak Z., *Declarative approach to cyclic steady states space refinement: periodic*

- processes scheduling*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67, 1–4, 137–155, 2013.
- [9] Powell D., Alfnes E., Semini M., *The Application of Lean Production Control Methods within a Process-Type Industry?: The Case of Hydro Automotive Structures*, IFIP International Federation for Information Processing, 243–250, 2010.
- [10] Pool A., Wijngaard J., van der Zee D.-J., *Lean planning in the semi-process industry, a case study*, International Journal of Production Economics, 131, 1, 194–203, 2009.
- [11] Hüttmeir A., de Treville S., van Ackere A., Monnier L., Prenninger J., *Trading off between heijunka and just-in-sequence*, International Journal of Production Economics, 118, 2, 501–507, 2009.
- [12] Abdulmalek F.A., Rajgopal J., *Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study*, International Journal of Production Economics, 107, 1, 223–236, 2007.
- [13] Matzka J., Di Mascolo M., Furmans K., *Buffer sizing of a Heijunka Kanban system*, Journal of Intelligent Manufacturing, 23, 1, 49–60, 2012.
- [14] Runkler T.A., *Controlling discrete manufacturing processes using Kanban and Heijunka approaches*, 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 181–186, 2011.
- [15] Bohnen F., Maschek T., Deuse J., *Leveling of low volume and high mix production based on a Group Technology approach*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 4, 3, 247–251, 2011.
- [16] Holt C.C., *Forecasting Trends and Seasonal by Exponentially Weighted Averages*, International Journal of Forecasting, 20, 1, 5–10, 2004.



# Multi-product sequencing and lot-sizing under uncertainties: A memetic algorithm

K. Schemelewa, X. Delorme, A. Dolgui\*, F. Grimaud

UMR CNRS 6158, LIMOS, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Henri Fayol Institute, 158, cours Fauriel, Saint-Étienne, France

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 20 January 2011

Received in revised form

28 March 2012

Accepted 26 June 2012

Available online 28 August 2012

### Keywords:

Lot-sizing

Sequencing

Random lead time

Random yield

Optimization

Memetic algorithm

## ABSTRACT

The paper deals with a stochastic multi-product sequencing and lot-sizing problem for a line that produces items in lots. Two types of uncertainties are considered: random lead time induced by machine breakdowns and random yield to take into account part rejects. In addition, sequence dependent setup times are also included. This study focuses on maximizing the probability of producing a required quantity of items of each type for a given finite planning horizon. A decomposition approach is used to separate sequencing and lot-sizing algorithms. Previous works have shown that the sequencing sub-problem can be solved efficiently, but the lot-sizing sub-problem remains difficult. In this paper, a memetic algorithm is proposed for this second sub-problem. Computational results show that the algorithms developed can be efficiently used for large scale industrial instances.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

In this paper, a multi-product lot-sizing and sequencing problem under uncertainties is studied. The source of the problem is derived from an automated semiconductor manufacturing plant where there are non-negligible percentages of rejects and breakdowns. However, this situation can concern any automatic production line working under uncertainties and the proposed approach could be easily extended to different types of production lines.

The example given here is from our experience of designing a paced line to produce several types of conductor patterns. These parts are used to obtain electronic modules (printed circuits). Since the considered semi-conductor factory is greatly automated, there is no staff other than maintenance for almost the whole day. The facility functions with three shifts. Specifically, the main task for the day shift is to define the production plan for the next 24 h and start the manufacturing process. The evening and night shifts, which consist of maintenance personnel only, insure the production line continue to function, but cannot change the production plan. As a consequence, the production plan is set for 24 h and will not be adjusted to take into account rejects or breakdowns that may occur in the later shifts.

After processing, parts (conductor patterns) are placed in an automatic storage system, and they are used for the assembly of

electronic modules. The automatic storage system is expensive and restricted in volume. Consequently, it should work with one day stock limit, if possible. So, this line and storage system should be able supply the next assembly line just-in-time. In other words, the following policy is applied: all the items used for assembly in period  $r+1$  must be in the storage system by the end of planning period  $r$ . At the beginning of the period  $r$ , the demand for all items types for assembly in the planning period  $r+1$  is known (taking into account the current stocks in the automatic storage system, if they exist, and the production plans of the assembly line for period  $r$  and  $r+1$ ). Thus, for each period  $r$ , the following question has to be answered: how many items of each type must be released to production in the beginning of the period  $r$  to obtain the necessary quantity for all components in the next production run  $r+1$  of the assembly line? With this sort of production, there is a non-negligible percentage of rejects, because some finished components are produced with unacceptable quality. Quality control is made at the end of the line with no intermediate quality control. In addition, the machines of the line are often stopped briefly because of breakdowns.

This leads to a new and very interesting production control problem dealing with optimal lot-sizing and scheduling under uncertainties. There are two types of possible policies which are in conflict. To diminish the influence of random breakdowns, the safety time (the difference between the duration of the planning horizon and the time necessary to produce all lots) can be increased, but in this case, it is necessary to reduce the sizes of lots, so the production plan can be more easily perturbed by rejects. On the other hand, the size of lots can be increased to diminish the impact of random rejects, but the line will be more

\* Corresponding author. Tel.: +33 4 77 42 01 66; fax: +33 4 77 42 66 66.

E-mail addresses: [kschemelev@ifma.fr](mailto:kschemelev@ifma.fr) (K. Schemelewa), [delorme@emse.fr](mailto:delorme@emse.fr) (X. Delorme), [dolgui@emse.fr](mailto:dolgui@emse.fr) (A. Dolgui), [grimaud@emse.fr](mailto:grimaud@emse.fr) (F. Grimaud).

sensitive to random breakdowns, because of insufficient safety time. There would be not enough time to repair of all these breakdowns and the line cannot produce the necessary quantity of items. Moreover, a set-up time is necessary between processing of two different products for reconfiguration of manufacturing facility. The set-up time depends on type of already manufactured product and new items to process. Thus, for the both policies mentioned above, there is an additional level of action affecting the safety time.

In this paper, we will reexamine the probabilistic formulation of this lot-sizing and scheduling problem, initially evoked in Dolgui (2002). For this problem, a first approach was suggested in Dolgui et al. (2005): authors have shown that this problem can be reduced to a single machine problem with sequence-dependent set-up times and that its optimal solution can be obtained using a decomposition into several optimization sub-problems: enumerating, sequencing and lot-sizing. Note that the latter two problems are NP-hard but the sequencing sub-problem can be transformed in a well-known Traveling Salesman Problem, for which there exist a large number of effective algorithms. For lot-sizing sub-problem, in Dolgui et al. (2005), the authors presented an idea how dynamic programming (DP) approach could be used to solve it. Nevertheless, only the decomposition framework and a recursive DP expression for lot-sizing were provided. No evaluating tests were performed. Thus, the question on the effectiveness of this approach for small, medium and large size cases is still open. This needed to be explored further which is the motivation of the current paper.

We present a global approach intended to treat actual problems of industrial sizes. This study will employ the earlier proposed overall decomposition approach. DP will be tested on several numerical examples and a memetic algorithm (MA) based on a local search (LS) and a genetic algorithm (GA) will be suggested for large scale cases.

The rest of the paper is organized as follows. Overall assumptions and problem statement are presented in Section 2. A review of related literature is given in Section 3. Section 4 introduces the solution framework: how the uncertainties are modeled and decomposition is accomplished. In Section 5, a Memetic Algorithm (MA) with its elements is presented. In Section 6, several experimental results comparing the algorithms (DP, LS, MA) are reported. Section 7 contains some concluding remarks and further perspectives.

## 2. Problem formulation

In this paper, a paced flow line that produces items of several types in lots is considered. This consists of several machines located sequentially according to a manufacturing process. One lot is a set of items of the same type that pass through the line sequentially without any other types inserted. A machine can produce no more than one item at the same time. There are no buffers between machines. The processing times are known and transfer times between machines can be integrated in processing times. There is a setup time between adjacent lots and before the first lot (these values are known for each pair of products). It is considered that in the beginning of the day (or planning horizon) production line is idle. To start any manufacturing process, the line needs a set-up procedure that depends on the type of product. As all products pass through all machines of the line, thus it is necessary to reconfigure each machine when changing the type of product.

The machines are considered as imperfect in sense that they: (1) can produce defective items; (2) are liable to breakdowns.

There is no intermediate quality control, thus defects are only detected after the last machine. These items cannot be reworked,

and are rejected. The probabilities of defective items for each item type and each machine are known. When a machine breakdowns, the line is stopped for a certain time for repair, during which no new items can be manufactured.

Machine breakdown rates are known. It is supposed that breakdowns occur only during ongoing manufacturing (when the line is stopped for maintenance or setup, breakdowns are not possible).

The decision variables are the sequence of lots and their size. The difficulty of this problem comes from the interdependence of the two types of decision variables: the optimal sequence depends on the sizes of lots and, vice versa, the optimal sizes of lots depend on the sequence selected. We need to find both the optimal sequence and sizes of lots maximizing the probability of obtaining the required quantities of items for each type by the end of the current planning period. The benefit of this optimization is evident. Without any additional resources, we will reduce the production cost and planning nervousness, because the next assembly line will produce with less of stoppages.

This problem has to be solved at the beginning of each production run. Thus, a one period model can be used. It must take into account two kinds of uncertainties: random lead time induced by machine breakdowns and random yield to take into account defective parts. An additional difficulty is a sequence-dependent set-up time between items of different types.

There are  $n$  types of items and  $m$  machines. The planning period duration (run) is equal to  $T$ . For items of type  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$  the following parameters are given:

- $d_i$ —demand level (defined by the assembly line);
- $t_{iq}$ ,  $q = 1, \dots, m$ —processing time required for manufacturing item  $i$  on machine  $q$ . Let  $T_{tr}$  be the transfer time of an item between two successive machines. We consider that transfer of all items on the line is simultaneous between all machines. So the takt time  $t_i$  for the production of item of type  $i$  is  $t_i = T_{tr} + \max_q t_{iq}$ ,  $i = 1, \dots, n$ . In the following we will use the  $t_i$  notion to represent the item's  $i$  unitary processing time. As this is a paced line, this assumption is not restrictive for the model proposed, and is used only to facilitate its presentation.

The following notations will be used to present sequence-dependent set-up times:

- $s_{i,j,q}$ —set-up time required in order to switch the production from items of type  $i$  to items of type  $j$  on machine  $q$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ ;  $q = 1, \dots, m$ . Set-up time begins only when the production line is empty, i.e. the last item of precedent lot has left the last machine of the line. As production of the product  $j$  begins once the set-up of all machines is finished, we can integrate the notion of the “line set-up time” and use the notation of  $s_{i,j}$  to represent it. Line set-up time  $s_{i,j}$  can be obtained as the maximum of the times for machine set-ups, i.e.  $s_{i,j} = \max_{q=1, \dots, m} s_{i,j,q}$ , where  $m$  is the number of machines in the line,  $s_{i,j} > 0$ ,  $i \neq j$ .
- $s_{0,i}$ —line set-up time required to start processing of items  $i$ , if the lot of items  $i$  is the first on the line,  $s_{0,i} > 0$ ,  $i \neq 0$ .

Hereafter, it is assumed that the set-up times satisfy the triangle inequality  $s_{i,j} + s_{j,k} \geq s_{i,k}$  for  $i = 0, \dots, n$  and  $j, k = 1, \dots, n$ .

The decision variables are  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  and  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ , where  $x_i$  is the size of lot for item  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , and  $\pi$  is the sequence of all lots. Each  $\pi_i \in [1, n]$ ,  $\pi_i \neq \pi_j$  when  $i \neq j$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ . The solution of the problem is a specific production plan that determines the quantity of items for all product types to manufacture and the order of lots on the production line.

In Fig. 1, we present an example.

For this example, the first lot to manufacture is a lot of product three that contains 26 items, i.e.  $x_3=26, \pi_1=3$ . The second lot is a lot of product five of 1187 items ( $x_5=1187, \pi_2=5$ ), and so on.

The total time for each lot  $i, i=1, \dots, n$  includes the following terms. Without losing generality, let this be the first lot on the production line, see Fig. 2:

- Set-up time  $s_{0,i}$  to prepare the line to produce items of type  $i$ .
- Loading time  $(m-1)t_i$ : at time  $s_{0,i}$  the first item of the lot  $i$  enters the first machine  $M_1$ , at  $s_{0,i}+t_i$  this item is transferred without any delay to the second machine  $M_2$  and, simultaneously, the second item of the lot is inserted in turn into the machine  $M_1$ , etc. So, the first item of the lot will be finished in  $s_{0,i}+m \cdot t_i$  units of time, the second in  $s_{0,i}+m \cdot t_i+t_i$ , etc. In other words, loading time is the period between the start of a lot and the moment when the first item enters the last machine. Assume that setups are impossible during this loading time. Note that after these  $(m-1)t_i, i=1, \dots, n$  units of loading time, i.e. in “steady state”, the production line can be considered as a single machine.
- Cycle time  $t_{p,i}$  for processing  $x_i$  components of lot  $i$  in “steady state”.

When the production line is empty, the next line set-up can start. This set-up is necessary to produce the second lot (product  $j$ ). Once again, the line set up time  $s_{i,j}$  is equal to the maximum among the set-up times of the machines. After the set-up, a lot of items  $j$  is released and we have a line loading that takes  $(m-1)t_j$  units of time, followed by cycle time  $t_{p,j}$  for this lot, and so on.

Data:  $n = 5, T = 24$  hours.

Lots	1	2	3	4	5
Demand $d_i$	18	55	25	60	1100
Processing time $t_i$	3	45	31	6	1

Solution

Lots	1	2	3	4	5
Sequence $\pi$	3	5	1	2	4
Sizes of lots $x$	26	1187	21	59	62

Fig. 1. A solution for the sequencing and lot-sizing problem.

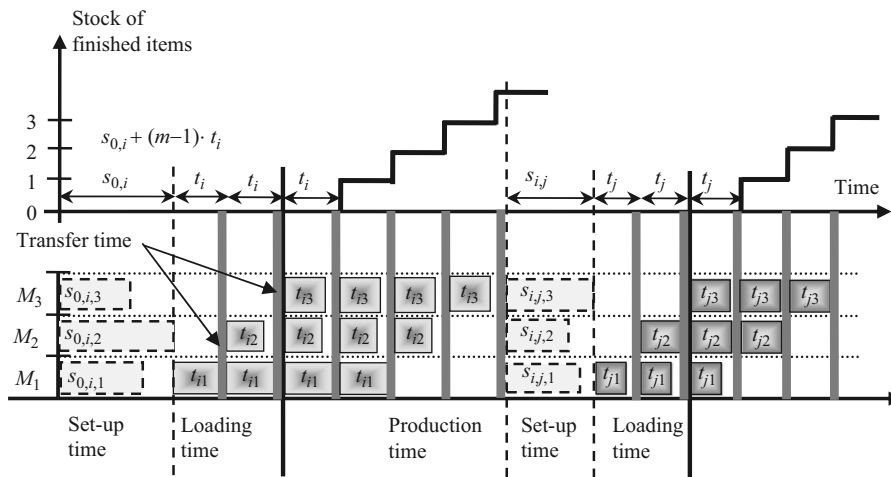


Fig. 2. Illustration of production process over time without rejects and breakdowns.

Fig. 3 demonstrates an example where rejects and breakdowns are taken into account.

As is the case often in semiconductor industry, we consider that defective items cannot be repaired and so they are disposed of. Let  $x_i^{act}$  be actual quantity of acceptable items (i.e. items of required quality) produced by the end of planning horizon from  $x_i$  items initially released, where  $x_i^{act} \leq x_i, i=1, \dots, n$ . Let  $T_s$  be the planned safety time (i.e. the time reserved for all repairs of any breakdown machines). Thus, the goal is to find a sequence  $\pi$  and lot sizes  $x$  to maximize service level. In other words, maximize the probability of obtaining the required quantities of items amongst all types at the end of period:

$$\text{Max } P(x_i^{act} \geq d_i, \quad i = 1, \dots, n(\pi, x)) \quad (1)$$

Hence, the maximum possible planned safety time for a given solution  $(\pi, x)$  can be calculated as follows:

$$T_s(\pi, x) = T - \left( s_{0,\pi_1} + \sum_{i=2}^n s_{\pi_{i-1}, \pi_i} + (m-1) \sum_{i=1}^n t_{\pi_i} + \sum_{i=1}^n t_{\pi_i} x_{\pi_i} \right) \quad (2)$$

where  $s_{0,\pi_1} + \sum_{i=2}^n s_{\pi_{i-1}, \pi_i}$  is the total set-up time,  $(m-1) \sum_{i=1}^n t_{\pi_i}$  is the total loading time.

When increasing the lot size of any type of item, the probability of satisfying the demand level for said item will also increase. Conversely, the planned safety time will decrease. If the planned safety time appears insufficient for the completion of all repairs, then the last lot cannot be completed or even not produced at all (see Fig. 3). Non-optimized set-up (lot sequence) can considerably reduce the time that can be allowed for planned

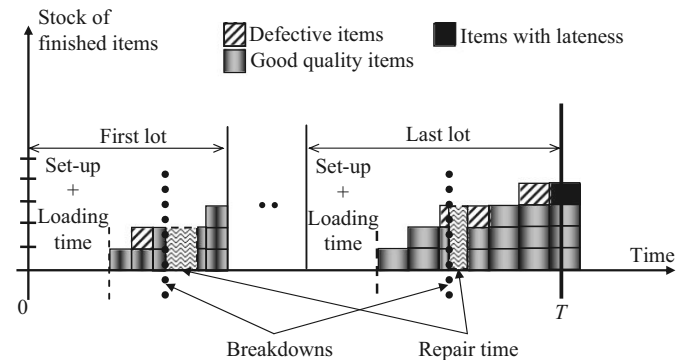


Fig. 3. Example of item flow with rejects and breakdowns.

safety time, and so can lead to the same consequences as insufficient planned safety time.

Note that, for the problem considered, if the actual quantity for a component is greater than required, the surplus items will be used in the next period. Thus, this quantity will be deducted from the demand for the next period. The corresponding inventory cost is not considered, because it can be neglected when compared with the cost of shortages.

### 3. Survey of literature

This is a recently stated problem, examined only in two previous publications (Dolgui, 2002) and (Dolgui et al., 2005). Nevertheless, there is an extensive literature on related problems of operations management (see for example, Dolgui and Proth, 2010). Thus, the objective of this section is to try to position this new problem on corresponding research domains and show problems containing certain similar elements. This can be useful to better understand the problem considered.

Our problem intersects two classes of optimization problems: (1) deterministic scheduling with batching and lot-sizing; and (2) lot-sizing for imperfect production systems.

Most often in literature, problems of lot-sizing and scheduling are considered in a deterministic environment. Emmons and Mathur (1995) studied the lot-sizing problem in a no-wait flow shop in which the jobs to process can be divided into groups according to their types. The goal was to find the optimal batch sizes and sequence of said batches to minimize the total completion time (makespan). A local search algorithm with dual re-optimization for the same sort of problem can be found in Meyr (2000). Cheng and Wang (2010) described a dynamic programming approach to resolve two problems for a single machine and a heuristic algorithm for parallel machines. Comprehensive surveys for integrated scheduling and lot-sizing can be found in Potts and Van Wassenhove (1992), Zhu and Wilhelm (2006) and Allahverdi et al. (2008). Usually, the above problems are treated as mixed integer programs.

Lot-sizing problems with random production or procurement yields were investigated by many authors. Yano and Lee (1995) presented a survey of this literature. Another review for MRP environments was given in Dolgui and Prodhon (2007). Arda and Hennes (2006) consider an inventory control problem where the arrivals of customers' orders are random and delivery times from suppliers are also random. Gerchak et al. (1994) introduced and analyzed the models for assembly systems with random component manufacturing and assembly yields. See also Inderfurth (2009), Jaber and Khan (2010), to name a few. In general, the problems of this type can be classified into three categories by their uncertainty modeling methods:

- *Bernoulli process*: the probability  $p$  that a item is of a good quality is given (see Singh et al., 1988; Teunter and Flapper, 2003).
- *Stochastically proportional yield*: the fraction of good quality components in a batch is known and does not depend on the size of batch (see Agnihotri et al., 2000; Wang and Gerchak, 2000; Li et al., 2008; Haji et al., 2008).
- *Interrupted geometric*: the probability  $p$  that the process will become "out-of-control" at a certain moment of time (and all components produced after this moment will be defective) is known (see Guu and Liou, 1999; Guu and Zhang, 2003; Maddah et al., 2010).

There are many methods for modeling breakdowns. For example, Lin and Gong (2006) studied the effects of machine breakdowns on an Economic Production Quantity (EPQ) model.

There, repair times are constant for all breakdowns, but the time between failures is a random variable with an exponential distribution. For more examples, see Giri and Dohi (2004), Giri and Yun (2005), Chakraborty et al. (2009), and Chiu (2010). Sometimes models proposed in literature contain both types of uncertainties: breakdowns and rejects, as in the paper of Radhoui et al. (2009) on maintenance planning, where a machine can produce defective units as well as can breakdown.

A problem of lot-sizing and sequencing on a single imperfect machine with breakdowns and rejects was studied in Dolgui et al. (2011). The objective was to minimize the total cost of client dissatisfaction. In that article, the authors replaced random variables with deterministic functions and presented a fully polynomial time approximation scheme (FPTAS) to minimize makespan or total cost of demand dissatisfaction for this deterministic model.

The problem studied in this paper, was uncovered in our earlier research. The two following papers have been published. These two publications form the framework of our current study.

In Dolgui (2002), the author considers models of renewal process and proves several mathematical properties of these models. He demonstrates how the probability of a given total cumulative time can be calculated for such a model. Then, an extension called a renewal process with random yield is proposed. Finally, the utility of these models is illustrated with an example where lot-sizing and scheduling decisions for a line should be evaluated taking into account machines breakdowns and part rejects. In fact, this was first time where the considered problem was evoked. Nevertheless, in Dolgui (2002) this was not an optimization but an evaluation problem. The message of the last section of that previous paper is that mathematical model of renewal process completed with a Bernoulli process model can be used to calculate service level for a given sequence and sizes of lots for the production lines where there are breakdowns and part rejects. This model based on renewal and Bernoulli processes are used in this current paper for the service level (fitness) calculation.

Dolgui et al. (2005) describe for the first time the optimization problem that we consider currently. The authors presented an iterative decomposition schema to solve to optimality this problem by considering separately sequencing and lot-sizing sub-problems. This was possible using a complete enumeration to decide which lot will be the last one in the sequence and solving subsequent lot-sizing and sequencing problems for the remaining lots. So, the authors concluded that, taking into account the fact that, in this decomposition, the sequencing sub-problem can be easily reduced to well-known asymmetric traveling salesman problem, to solve the initial problem it is only necessary to develop a method for the lot-sizing sub-problem. The authors suggested a dynamic programming (DP) algorithm. Note that only one numerical example with four lots to illustrate calculation steps was provided. There are no experimental results showing the performance of this exact approach. This explains some of the motivation of our present work.

In this paper, we will provide the results of our experimental study of the DP algorithm and show that it should be used only for small size cases up to 13 lots maximum. Then, to tackle larger industrial problems, we will develop a memetic algorithm which can finally give good quality approximate solutions for large scale cases.

## 4. Resolution framework

### 4.1. Calculation of the overall service level for a feasible solution

For the problem considered, the criterion is the overall service level, i.e. the probability of obtaining the required quantities of

items for each type at the end of period. This criterion takes into account both rejects and breakdowns, i.e. random number of good quality items and random total working time of the line. Note that the line considered is a paced line where if a machine breakdowns then the entire production line is halted. Also, the setups are made for all machines simultaneously. Thus, this multi-machine line can be mathematically treated for the final probability calculation as a single machine under the condition the loading time, line breakdown and repair rates and set-up times can be calculated. The loading and setup times have been considered in Section 2. How to calculate breakdown and repair rates of this “single”-machine line by using the characteristics of individual machines will be shown hereafter.

In this paper, we postulate that the number of failures and repairs for a given period follow Poisson processes. This means that number of events (failures or repairs) for a time interval depends on the length of this interval and the rate parameter of the corresponding Poisson process. The length of periods between two successive events follows an exponential probability density. We suppose that Mean time to Failure (MTTF)  $1/u_q$  and Mean time to Repair (MTTR)  $1/r_q$  for each machine are known,  $q, q=1, \dots, m$ . MTTF  $1/U$  and is MTTR  $1/R$  of the whole line can be calculated as follows:

$$U = \sum_{q=1}^m u_q \text{ and } R = \left( \sum_{q=1}^m \frac{u_q}{r_q U} \right)^{-1} \quad (3)$$

Cumulative working time (the sum of all periods of work between breakdowns) is a random variable. The model of renewal processes proposed in Dolgui (2002) can be used to calculate the probability that the cumulative working time for a given horizon  $T$  is greater than or equal to the time necessary to process all considered items  $T_p$  which is known for a given solution  $(\pi, x)$  and is equal to  $\sum_{i=1}^n t_i x_i$ .

Note that in our model neither cumulative working time nor time to process all considered items contain set-up and loading time, because we assume that breakdowns are possible only during working time (breakdowns are not possible during set-up time and those that occur during loading time are taken into account in Eq. (3) where failure and repair rates of the line are calculated). Set-up and loading times are deduced from available time and then only working and repair times are considered.

Remember, the objective of the problem is to maximize the probability (1), that is equivalent to the following expression (see Dolgui et al., 2005):

$$\text{Max} \prod_{i=1}^{n-1} P(x_i^{act} \geq d_i | x_i) \times \left[ \sum_{s=d_n}^{x_n} P(x_n^{act} \geq d_n | s) \times (\text{Pr}(s+1) - \text{Pr}(s)) \right] \quad (4)$$

where  $\text{Pr}(s) = \exp\{-UT_p^{x_n=s} - RT_s^{x_n=s}\} \times \sum_{v=1}^{\infty} \left( \frac{(UT_p^{x_n=s})^v}{v!} \sum_{j=0}^{v-1} \frac{(RT_s^{x_n=s})^j}{j!} \right)$ , and  $P(x_i^{act} \geq d_i | x_i)$  is the probability to obtain at least  $d_i$  items of good quality when  $x_i$  items of lot  $i$  were produced, which can be calculated as follows (using Bernoulli's formula):

$$P(x_i^{act} \geq d_i | x_i) = \sum_{s=d_i}^{x_i} C_{x_i}^s (1-p_i)^{(x_i-s)} p_i^s \quad (5)$$

where  $p_i = \prod_{q=1}^m p_{iq}$ , and  $p_{iq}$  is the probability of obtaining an item of good quality of type  $i, i=1, \dots, n$  at machine  $q, q=1, \dots, m$ .

Note that the expression (4) contains the probabilities to obtain at least  $d_i$  items of adequate quality for each lot  $i, i=1, 2, \dots, n$ . For the first  $n-1$  lots, this probability depends only on rejects, while for lot  $n$  it depends on both rejects for lot  $n$  and all breakdowns for the planning horizon (cumulative repair time). Remark that the formula to calculate  $\text{Pr}(s)$  contains an infinite sum.

Nevertheless, we can find upper and lower bounds to obtain its approximate value as follows (Dolgui, 2002):

$$\overline{\text{Pr}(s)} = \exp\{-UT_p^{x_n=s} - RT_s^{x_n=s}\} \sum_{v=1}^L \left( \frac{(RT_s^{x_n=s})^v}{v!} \sum_{j=0}^{v-1} \frac{(UT_p^{x_n=s})^j}{j!} \right) \text{ and}$$

$$\underline{\text{Pr}(s)} = 1 - \exp\{-UT_p^{x_n=s} - RT_s^{x_n=s}\} \sum_{v=1}^L \left( \frac{(UT_p^{x_n=s})^v}{v!} \sum_{j=0}^{v-1} \frac{(RT_s^{x_n=s})^j}{j!} \right) \quad (6)$$

The value  $L$  of the number of elements for the sum is chosen using:  $\overline{\text{Pr}(s)} - \underline{\text{Pr}(s)} \leq 2\varepsilon$ , where  $\varepsilon$  is a positive value of admitted error as close to zero as possible. Finally, value  $\text{Pr}(s)$  can be found as follows:  $(\overline{\text{Pr}(s)} + \underline{\text{Pr}(s)})/2$ .

Equations of this section will be used in the following sections to calculate the solution's fitness value for proposed approaches.

#### 4.2. Optimization via decomposition

In Dolgui et al. (2005), a decomposition schema to obtain an exact solution was presented. As aforementioned, this was based on the complete enumeration for last lot, and solving separately subsequent sequencing problems and lot-sizing for the remaining lots. The sequencing sub-problem can be easily reduced to the well-known asymmetric traveling salesman problem. The lot-sizing problem is an extension of the knapsack problem which needs specific solutions. Here, we present just a brief description of this decomposition idea.

There are  $n$  lots to process, so the decision space is  $\Pi \times X$ , where  $\Pi$  is the set of all possible permutations  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$  (sequences of lots) on the set  $\{1, \dots, n\}$  and  $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ ,  $X_i$  is the set of possible values for the size of lot  $i$ . Let the initial problem (1) be called  $P$  and  $(\pi^*, x^*) \in \Pi \times X$  be the optimal solution of this problem.

By transforming Eqs. (1)–(4), the following three-level decomposition is possible which guarantees the optimality of the solutions. The first level of decomposition splits the problem  $P$  into  $n$  equivalent sub-problems  $P1$  as follows:

- $P1$ : maximizing the probability to satisfy the overall demand under the condition that the last lot  $\pi_n$  is fixed. Assign in order  $\pi_n = 1, 2, \dots, n$ , and for each value  $i$  of  $\pi_n$ , solve the following problem:

$$\text{Max } P(x_i^{act} \geq d_i, i = 1, \dots, n | (\pi, x)) \quad (7)$$

$$(\pi, x) \in \Pi \times X \text{ and } \Pi(i) = \{ \pi \in \Pi | \pi_n = i \}$$

Resolving the sub-problem  $P1(i)$  gives an optimal solution of the initial problem for the case  $\pi_n = i$ . When all sub-problems  $i = 1, 2, \dots, n$  are resolved, the best solution is the optimal solution of the problem  $P$ .

In turn, each problem  $P1(i)$  can be decomposed in two sub-problems:  $P2(i)$  and  $P3(i)$ .

- $P2$ : once the last lot  $\pi_n$  is set, the sequence of other lots has an influence on the time remaining for the line repairs. Increasing the total set-up time decreases planned safety time  $T_s$ . So, the optimizing the sequence of lots is equivalent to the following problem:

$$\text{Min } S(\pi) = s_{0, \pi_1} + \sum_{j=2}^n s_{\pi_{j-1}, \pi_j}, \quad \pi \in \Pi(i), \quad \pi_n = i \quad (8)$$

This problem is equivalent to the well-known Asymmetric Traveling Salesman Problem and can be solved using the

appropriate methods, see for example Choi et al. (2003), Xing et al. (2008), and Öncan et al. (2009). Hereafter, it is assumed that the optimal sequence  $\pi^*(i)$  was found and lots are renumbered correspondingly.

- P3: This problem consists in determining the optimal sizes of all lots to maximize the service level (4) subject to a given sequence of lots.

Dolgui et al. (2005) suggested a Dynamic Program (DP) to find the optimal solution of the problem P3. The three-level decomposition and DP define a resolution method that can theoretically solve this complex problem to optimality. However, there is no performance evaluation of the method done as of yet.

### 5. Lot-sizing subproblem

The sub-problem P1 is a simple enumeration, and sub-problem P2 can be solved efficiently using known methods from literature. Therefore, hereafter, we deal with only the sub-problem P3. It is supposed that the sequence of lots  $\pi^*$  was set, all lots were renumbered accordingly and total set-up time  $S(\pi^*)$  was calculated.

While DP from Dolgui et al. (2005) provides an optimal solution, it might be inefficient for large scale instances because of the rapidly growing computing time and computer memory required. As mentioned earlier in this paper, a Memetic Algorithm (MA), i.e. a Genetic Algorithm (GA) with a Local Search (LS), will be proposed instead of DP to solve this lot-sizing sub-problem P3 for large scale instances. First of all, in Section 5.1, why this type of approach was chosen to resolve our problem will be explained. In the same section, a general schema of the algorithm will be outlined. Then, solution coding method and fitness function are presented in Section 5.2. The second part of Section 5.2 deals with the calculation of upper and lower bounds for sizes of lots. In Section 5.3, the process of initial population generation and distance metric are described. Section 5.4 explains the genetic operations used in the MA (crossover, mutation, and replacement selection). Finally, in Section 5.5, the local search procedure is presented.

#### 5.1. Choice of a memetic algorithm and its structure

The objective is to find the lot sizes which maximize the probability (4) to produce required quantity of adequate quality items of all types. First of all, a genetic algorithm for this problem will be developed.

Genetic algorithms were first proposed by Holland (1975) and Goldberg (1989). For general description of GAs see also Cox (2005) and Said (2005). Genetic algorithms are widely used to resolve different design and planning problems. Examples can be found in Chen et al. (2002), Pierreval et al. (2003), and Hnaïen et al. (2009). There are some papers presenting GAs for different lot-sizing models, for example, Lee et al. (1997) propose a genetic algorithm for solving both scheduling and lot-sizing problems to minimize the makespan. In Hernandez and Suer (1999), an algorithm was presented for an incapacitated, single-item, single-level lot-sizing problem. Dellaert et al. (2000) suggested a binary encoding GA to resolve a multi-level lot-sizing problem. Gaafar (2006) applied a GA to a deterministic time-varying lot-sizing problem with batch ordering. Some other interesting applications of GA are presented in Yao and Huang (2005), Supithak et al. (2010), and Rezaei and Davoodi (2011). As one can see, there are a number of examples in literature, where GA's were successfully used for different lot-sizing problems. Their authors report that good results were obtained. In our opinion, they are so popular because of reasonable CPU time, high quality solutions, and simplicity in lot-sizing solution coding.

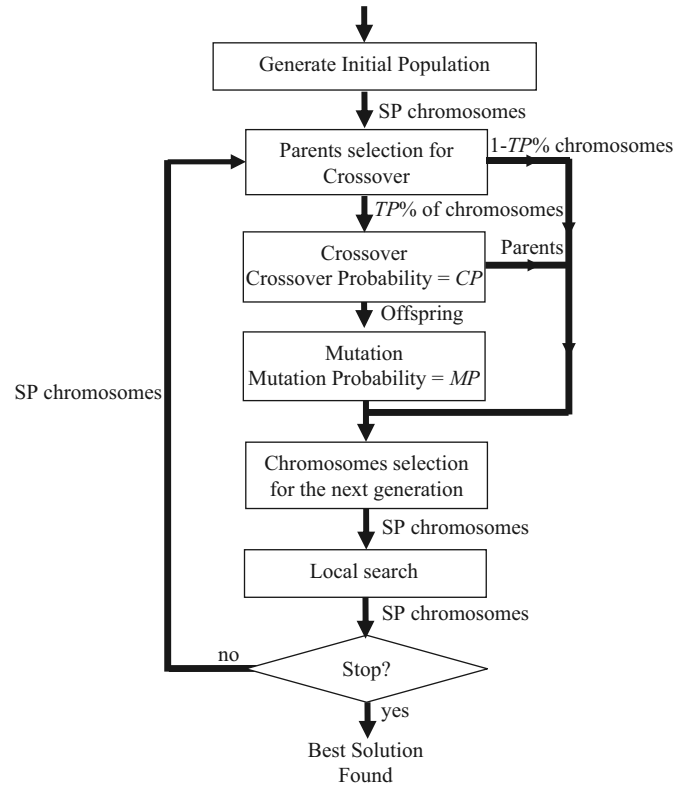


Fig. 4. Scheme of MA.

Size	12	7	3	9	2	6
Lot	1	2	3	4	5	6

Fig. 5. Example of a solution when  $n=7$ .

Thus, we will use this type of algorithm with a standard overall scheme (see Fig. 4):

- create a set of solutions presenting an initial population, and
- apply the operations of crossover and mutation.

In addition, to speed-up convergence, a LS procedure will be applied at the end of each iteration. It is important to point out that hybrid genetic algorithms like we are using (with integrated local search procedure) are also called Memetic Algorithms (Moscato, 1989).

#### 5.2. Coding of solutions and fitness

Decision variables are the sizes of lots. Each solution can be presented as an array of integer numbers, where each element represents the size of an appropriate lot. The size of the last lot is calculated separately, so if we have  $n$  types of products, then the length of each solution is equal to  $n - 1$ . Represent a chromosome as a vector (for example, vector  $g$ ) that contains  $n - 1$  elements:  $g = (g_1, g_2, \dots, g_{n-1})$ . Each  $g_i, i = 1, \dots, n - 1$  represents the quantity of items of product  $i$  that we will manufacture.

Fig. 5 presents an example for a problem with  $n=7$ . Here, the size of the first lot is equal to 12, for the second, it is equal to seven, and for the third, it is equal to three, etc.

Each chromosome  $g$  is characterized with its fitness  $f(g)$ , which is calculated using Eqs. (4)–(6) from Section 4.1.

To calculate the Upper and Lower Bounds on quantities, let us suppose we know a solution with overall service level  $\beta$ .

Then, solutions with a service level for any item type smaller than  $\beta$  should be excluded, because they cannot provide better overall service level than the known solution (Dolgui et al., 2005). The same reasoning applies when there is an a priori required minimal service level for the line, i.e. we search for a solution with the overall service level greater than or equal to this minimal service level. *Note:* minimal service level is fixed in advance and applied to all products. Thus, using Eq. (5), a minimum quantity  $x_i^{min}$  of items of each lot  $i=1,2,\dots,n$  which have to be processed, can be calculated as follows:

$$x_i^{min} = \min\{z|P(x_i^{act} \geq d_i|z) \geq \beta, \quad z = d_i, d_i + 1, \dots\} \quad (9)$$

In other words,  $x_i^{min}$  is the minimal size of lot  $i$ ,  $i=1,2,\dots,n$  for which the probability to satisfy the demand  $d_i$  is no less than  $\beta$ .

Similarly, the maximum size  $x_i^{max}$  for each lot can be calculated as follows:

$$x_i^{max} = \min\{z|P(x_i^{act} \geq d_i|z) \geq 1-\varepsilon, \quad z = d_i, d_i + 1, \dots\} \quad (10)$$

where  $\varepsilon$  is a relative small positive value close to zero,  $x_i^{max}$  is the minimal size of the lot  $i$  such that the probability of obtaining at least  $d_i$  good quality items from  $x_i^{max}$  processed is sufficiently close to 1. Value of  $\varepsilon$  is fixed and the same for all products. It influences the upper bound of lot size values: decreasing of  $\varepsilon$  implies increasing of  $x_i^{max}$ ,  $i=1,2,\dots,n$  and vice versa.

In certain cases, this upper bound value  $x_i^{max}$  can be ameliorated using the value  $x_i^{upp}$ :

$$x_i^{upp} = \min\{x_i^{max}, x_i^{min} + T_s(\pi^*, x_i^{min})/t_i\} \quad (11)$$

This additional condition is very useful because value  $x_i^{max}$  can be very significant. Term  $x_i^{min} + (T_s(\pi^*, x_i^{min})/t_i)$  represents the maximum quantity of items of type  $i$  that can actually be produced under the following conditions: (i) the sizes of other lots are minimal, i.e.  $x_i^{min}$ ; (ii) there is not any machine breakdown.

For each chromosome representing a sequence of  $n-1$  first lots with their sizes, the probability to satisfy the demands is calculated under assumption that  $x_n = x_n^{upp}$ .

To decrease calculation time, after the first generation of the MA, determine the matrix  $M\langle X, p \rangle$ , each line  $i$ ,  $i=1,2,\dots,n-1$  of which is intended to store the probabilities  $P(x_i^{act} \geq d_i|x_i)$  for the corresponding product  $i$ , where  $x_i$  is from  $x_i^{min}$  to  $x_i^{upp}$  inclusive.  $X$  represents a matrix of all possible lot sizes, i.e.  $X[i][b] = x_i^{min} + b - 1$  for  $b \in [1, x_i^{upp} - x_i^{min} + 1]$ . Remark that the quantity of elements in each line can differ. This matrix avoids computing the probabilities  $P(x_i^{act} \geq d_i|x_i)$  with Eq. (5) for the evaluation of each solution during subsequent iterations (see Section 5.4.6). Indeed,  $P(x_i^{act} \geq d_i|x_i)$  is equal to  $M\langle X, p \rangle[i][x_i - x_i^{min} + 1]$ , where  $i=1,2,\dots,n-1$ .

### 5.3. Creation of initial population

Let SP be the size of the population. To have several solutions of a good quality, we apply three heuristic algorithms.

The main idea of the first algorithm G1 is to take a solution  $y^0$  where all sizes of lots  $y_i^0$  for  $i=1,2,\dots,n-1$ , are set to their corresponding minimal values  $x_i^{min}$ . Then, by increasing the lot size with a minimal value of probability  $P(x_i^{act} \geq d_i|y_i^0)$ , we can increase the total probability of demand satisfaction for the current solution. If this is the case, continue to increase corresponding values (one value at each iteration), otherwise the algorithm stops.

#### Algorithm G1.

1. Set  $j=0$ . Create a solution  $y^0 = (y_1^0, y_2^0, \dots, y_{n-1}^0)$ , where  $y_i^0 = x_i^{min}$ ,  $i=1, \dots, n-1$ . Calculate the cumulative processing time for the solution  $y^0$ :  $T_p(y^0) = \sum_{i=1}^{n-1} t_i y_i^0$ .

2. Let  $I_{min}^0 = \arg \min_{i \in \{1, \dots, n-1\}} (P(x_i^{act} \geq d_i|y_i^0))$ ,  $p_0 = P(x_i^{act} \geq d_i, i=1, \dots, n|y^0)$ .

3. Create solution

$$y^1 : y_i^1 = \begin{cases} y_i^0 + 1, & \text{if } i = I_{min}^0 \\ y_i^0, & \text{otherwise} \end{cases}; \quad i = 1, \dots, n-1; \quad j = 1.$$

4. While  $\left( T_p(y^j) < T - S(\pi^*) - (m-1) \sum_{i=1}^n t_i \quad \text{and} \quad P(x_i^{act} \geq d_i, i = 1, \dots, n|y^j) > p_{j-1} \right)$  Do:

- I.  $p_j = P(x_i^{act} \geq d_i, i = 1, \dots, n|y^j)$ ;

- II.  $J_{min}^j = \arg \min_{i \in \{1, \dots, n-1\}} (P(x_i^{act} \geq d_i|y_i^j))$ ;

- III. Create  $y^{j+1} : y_i^{j+1} = \begin{cases} y_i^j + 1, & \text{if } i = J_{min}^j \\ y_i^j, & \text{otherwise} \end{cases}; \quad i = 1, \dots, n-1$ ;

- IV.  $j := j + 1$ .

End while.

Algorithm G2 consists in the following: create a solution  $g^0$  where all genes  $g_i^0$  are set to corresponding maximal values of lot sizes  $x_i^{upp}$ . Then, by decreasing the size of lot with a maximal value of the probability  $P(x_i^{act} \geq d_i|g_i)$ , the total probability to satisfy the demand for the current solution increases. If this is the case, continue to decrease corresponding values (one for each iteration), otherwise the algorithm stops.

#### Algorithm G2.

1. Create a solution  $g^0 = (g_1^0, g_2^0, \dots, g_{n-1}^0)$ , where  $g_i^0 = x_i^{upp}$ ,  $i=1, 2, \dots, n-1$ ; set  $j=0$ . Calculate the cumulative processing time for this solution:  $T_p(g^0) = \sum_{i=1}^{n-1} t_i g_i^0$ .

2. Let  $I_{max}^0 = \arg \max_{i \in \{1, \dots, n-1\}} (P(x_i^{act} \geq d_i|g_i^0))$ ,  $p_0 = P(x_i^{act} \geq d_i, i = 1, 2, \dots, n|g^0)$ .

3. While  $\left( T_p(g^0) + t_n d_n < T - S(\pi^*) - (m-1) \sum_{i=1}^n t_i \right)$  Do:

- I.  $g_{I_{max}^0}^0 = g_{I_{max}^0}^0 - 1$ ;

- II.  $J_{max}^0 = \arg \max_{i \in \{1, \dots, n-1\}} (P(x_i^{act} \geq d_i|g_i^0))$ .

4. Create solution

$$g^1 : g_i^1 = \begin{cases} g_i^0 - 1, & \text{if } i = I_{max}^0 \\ g_i^0, & \text{otherwise} \end{cases}; \quad i = 1, 2, \dots, n-1; \quad \text{set } j = 1.$$

5. While  $(P(x_i^{act} \geq d_i, i = 1, \dots, n|g^j) > p_{j-1})$  Do:

- I.  $p_j = P(x_i^{act} \geq d_i, i = 1, \dots, n|g^j)$ ;

- II.  $J_{max}^j = \arg \max_{i \in \{1, \dots, n-1\}} (P(x_i^{act} \geq d_i|g_i^j))$ ;

- III. Create  $g^{j+1} : g_i^{j+1} = \begin{cases} g_i^j - 1, & \text{if } i = J_{max}^j \\ g_i^j, & \text{otherwise} \end{cases}; \quad i = 1, 2, \dots, n-1$ ;

- IV.  $j := j + 1$ .

End while.

**Algorithm G3.** Finds the ‘‘average’’ solution  $g^{av} = (g_1^{av}, g_2^{av}, \dots, g_{n-1}^{av})$  where  $g_i^{av} = [(x_i^{min} + x_i^{upp})/2]$ .

The other SP-3 chromosomes of the initial population are generated randomly. Each gene  $g_i$  of a solution is generated in range  $[x_i^{min}, x_i^{upp}]$ . To avoid solutions with a null probability the

following condition must hold:

$$\sum_{i=1}^{n-1} t_i g_i + t_n d_n < T - S(\pi^*) - (m-1) \sum_{i=1}^n t_i \quad (12)$$

Eq. (12) verifies that the time needed to process  $g_i$  items for  $n-1$  first product and  $d_n$  items of the last product is less than the actual manufacturing time available, which can be found by subtracting the total set-up time  $S(\pi^*)$  and total loading time  $(m-1) \sum_{i=1}^n t_i$  from the value of the planning horizon  $T$ . Otherwise, several items of the last product will not be produced; consequently, the probability  $P(x_n^{act} \geq d_n | g_n)$  is equal to 0, so the service level is equal to zero also. If such a solution is generated, it is rejected and one other solution is created.

When a new solution  $g$  is obtained, it is compared with all solutions generated earlier to avoid: (1) clones; (2) solutions which are too close to each other (see Section 5.4.5). To decide if any two solutions are close to each other and by how much, we introduce the distance metric. Let  $y^1$  and  $y^2$  be two solutions. Then, the distance  $d(y^1, y^2)$  between these solutions is equal to:

$$d(y^1, y^2) = \sum_{s=1}^{n-1} |y_s^1 - y_s^2| \quad (13)$$

In other words, the distance between two solutions is determined using the  $L1$  norm. In our experiments the minimum authorized distance between two chromosomes is equal to three except for the mutation operator when this distance is two.

The process of solution's generation is repeated until the necessary quantity of solutions is obtained.

#### 5.4. Genetic operators: crossover, mutation, and replacement selection

##### 5.4.1. Selection and crossover

A crossover operator is used to generate new solutions with features similar to the best solutions in the population. To determine the pairs of parents for the crossover, a tournament selection is used. For that, choose randomly two chromosomes from the current population, the one with the greater fitness value will become the first parent and the second is then rejected. Again, the second parent-solution is chosen in the same manner. This procedure should be repeated as many times as necessary. TP is a parameter of the algorithm which is the percentage of population solutions to be selected for the crossover.

There is also another parameter: a crossover probability CP (equal for each pair of potential parents). This means that it is not sure that each couple of chromosomes chosen in the previous step will produce two new offspring. To accomplish this, for each couple, we generate a number in the range  $[0,1]$ , if this number is less or equals to CP, the crossover operation will be applied for a selected pair of chromosomes. A hybrid crossover operation is employed, where for each offspring's gene there are two possibilities: (1) takes a value of corresponding gene of one of its parents; (2) its value is generated randomly in the range delimited by corresponding parent's genes. The second issue is possible with probability equal to CP. The procedure of crossover for a given pair of parents  $g^{p1}$  and  $g^{p2}$  is as follows:

##### 5.4.2. Crossover operation

1. For each gene  $i, i=1,2,\dots,n-1$  generate randomly a number in the range  $[0,1]$  (the probability that this gene will be changed).
2. If this number is less than CP then.
  - 2.1. Let  $g_i^< = \min\{g_i^{p1}, g_i^{p2}\}$  and  $g_i^> = \max\{g_i^{p1}, g_i^{p2}\}$ .

- 2.2. Set  $g_i^{o1} = \text{uniform}[g_i^<, g_i^>]$  and  $g_i^{o2} = \text{uniform}[g_i^<, g_i^>]$ .
3. Else set  $g_i^{o1} = g_i^{p1}$  and  $g_i^{o2} = g_i^{p2}$ .
4. Add offspring  $g_i^{o1}$  and  $g_i^{o2}$  to the population.

Repeat the same procedure for all selected pairs of parents.

##### 5.4.3. Mutation

A mutation operator is used to increase the population's diversity. The mutation operation is applied to all offspring from the last generation. The mutation probability is equal to MP for each offspring. Let  $g = (g_1, g_2, \dots, g_{n-1})$  be a chromosome that will mutate. To determine which genes of a given offspring will mutate, we use the same mutation probability MP, i.e. each gene  $i, i=1,2,\dots,n-1$  of the chromosome  $g$  has a probability MP to mutate. The mutation operator used acts as a noising method which randomly shifts the value of some genes of a chromosome. The mutation of an offspring  $g$  to  $g^{mut}$  is as follows.

##### 5.4.4. Mutation operation

1. For each  $i, i=1,2,\dots,n-1$ , generate a value  $mv_i$  in the range  $[0,1]$ .
2. If  $(mv_i < MP)$  Do:
  - I. Construct the set of values for the gene  $i$  as follows:
 
$$\{-[(x_i^{upp} - x_i^{min})/4], \dots, [(x_i^{upp} - x_i^{min})/4]\} \cap \{[x_i^{min} - g_i, -2] \cup [2, x_i^{upp} - g_i]\}$$
  - II. Choose randomly one element  $m^i$  from this ensemble and set  $g_i^{mut} := g_i + m^i$ .
  3. Else  $g_i^{mut} := g_i$ .

At this step, we evaluate all the offspring created and sort the newly obtained population. Note that for this mutation operator, the minimal distance between initial and obtained chromosomes is equal to two.

##### 5.4.5. Replacement selection

This chooses the solutions from the population to keep for the next generation. Our selection is based on three steps:

- Update of the bounds (on quantities) and solutions accordingly.
- Deletion of redundant solutions.
- Actual selection among remaining solutions or completion of the population when needed.

##### 5.4.6. Updating process

If the fitness value  $f^{best}$  of the best solution for current generation is greater than the current service level probability  $\beta$ , then set  $\beta = f^{best}$  and recalculate the values  $x_i^{min}$  using the formula (9) for each  $i, i=1,2,\dots,n-1$ . Considering new values of  $x_i^{min}$ , verify that each gene  $g_i$  of all the solutions in the population is in the range  $[x_i^{min}, x_i^{upp}]$ . If this is not the case, i.e.  $g_i$  is less than  $x_i^{min}$ , then set  $g_i = x_i^{min}$ . This process is recursive if these changes generate a new best solution in the population. Update the fitness matrix  $M \langle X, p \rangle$  by deleting useless probabilities.

##### 5.4.7. Deleting clones

This includes the elimination of both repetitive and too close solutions. To delete these nearby solutions, calculate the distance  $d(g^z, g^w)$  between each pair  $(z,w), z,w \in [1,SP]$  of solutions of the population, using the formula (13). If the distance  $d(g^z, g^w)$  is strictly less than 3, the solution with the lower fitness value is eliminated.

If the residual number of solutions in the population is less than SP, which is a given parameter of the algorithm, regenerate randomly a required quantity of additional solutions, respecting the minimum authorized distance between solutions (this insures a diversified population). Otherwise, use an elitism strategy to choose the SP best solutions for the next generation.

### 5.5. Local search algorithm

Local search is often used to tackle hard computational problems. The procedure starts from any feasible solution—created randomly or found with help of a heuristic. Then, considering neighborhoods, depending the problem studied, a set of neighbor solutions is defined. If there exist in this set a better solution, the current solution is replaced. The local search stops if either: (i) the limit of the calculation time is reached; or (ii) the current best solution cannot be improved, because a local optimum was found. In the case of genetic algorithms, local search is usually applied on the best solution at the end of each generation in order to ameliorate it.

In our Memetic algorithm we use the procedure Local Search (LS) explained below. Let  $y$  be a solution that we are trying to ameliorate. Then, to execute one iteration of the local search, the following steps should be performed.

#### 5.5.1. Local search

1. Create set  $N(y)$  of solution-neighbors for a chosen solution  $y=(y_1, y_2, \dots, y_{n-1})$  in the following way:  $N(y) = \{y' | d(y, y') = 1; x_i^{\min} \leq y'_i \leq x_i^{\max}; i = 1, 2, \dots, n-1\}$ .
2. Evaluate (see Section 5.2 “Coding of solutions and fitness”) all solutions belonging to the set  $N(y)$ .
3. If there is one (or several) solution(s)  $y' \in N(y)$  such that  $f(y') > f(y)$ , replace the initial solution  $y$  with the solution with the maximal fitness.
4. End of algorithm.

Note that the use of the condition  $d(y, y')=1$  implies there exists a single index  $i, i=1, 2, \dots, n-1$  such that or  $y'_i = y_i + 1$  or  $y'_i = y_i - 1$ .

If the current best solution has not changed since the last generation and cannot be improved with the local search procedure (local maximum was reached), then LS operation will be applied to the solution with the best fitness among the remaining solutions which could be ameliorated.

The Memetic Algorithm (MA) stops after a certain number of generations or when a given time limit is reached.

## 6. Computer experiments

This section is divided into five parts. Section 6.1 presents how the problem instances were generated and the main parameters of the MA proposed. Section 6.2 announces the methods that will be tested and compared. Section 6.3 demonstrates the limitations of DP method. Section 6.4 provides an analysis of quality for MA solutions for the instances of small size. Finally, in Section 6.5, the MA is compared with the LS for large scale problems.

### 6.1. Problem instance generation

All the tests were run on a SUN UltraSPARC IIIi with 1593 MHz CPU and 16 Gb of RAM.

The planning horizon  $T$  is equal to 24 h. Considering numerical characteristics of industrial instances, for each problem, the following values were randomly generated:

- Demands  $d_i, i=1, 2, \dots, n$  in the range [10, 50] or [20, 30].
- Mean time to failure  $1/u_l$  in the range [50, 500] or [200, 300] h for each machine  $l=1, 2, \dots, m$ .
- Mean time to repair  $1/r_l$  in the range [0.3, 1] or [0.5, 0.6] h for each machine  $l=1, 2, \dots, m$ .
- Total line processing time (including all loading time) in the range  $[0.5 T, 0.6 T]$  or  $[0.7 T, 0.8 T]$ .

All possible combinations of intervals for these four parameters were considered to create 16 families of instances. Ten instances for each family were generated, giving 160 instances in total for each studied size  $n$  of the problem.

Total set-up time was set at 2 h. Minimal service level probability is the same for each type of products and is equal to  $\beta=0.7$ . The probabilities  $p_i$  that a given item of product  $i, i=1, 2, \dots, n$  is an item of adequate quality are generated in the range [0.8, 0.95].

Total line processing time belongs to the interval  $[\alpha_1 T, \alpha_2 T]$ , the pair  $[\alpha_1, \alpha_2]$  corresponds to {0.5, 0.6} or to {0.7, 0.8}. To generate values  $t_i, i=1, 2, \dots, n$ , the following steps are performed:

1. Generate value  $\alpha$  in range  $[\alpha_1, \alpha_2]$ .
2. Calculate an approximate total processing time  $T_{proc} = \alpha T$  for current instance.
3. Calculate the following value:

$$N_{pc} = \sum_{i=1}^n d_i + n(m-1).$$

This represents the total number of items of all types which should have been produced by the end of the planning horizon plus an additional number of items to represent the loading time.

Divide  $T_{proc}$  by the number of items  $N_{pc}$  to have an approximate value for the processing time of one item for any product type  $t_{item} = T_{proc} / N_{pc}$ .

Generate values  $t_i, i=1, 2, \dots, n$  in the range  $[0.5 t_{item}, 1.5 t_{item}]$ , representing the unitary processing time of the corresponding product type.

#### 6.1.1. MA parameters

For each generated instance, five independent runs of the Memetic Algorithm were carried out. The time for each run was limited to  $0.2n$  s, where  $n$  is the size of a problem. For example, for  $n=8$  lots, this limit is equal to 1.6 s, for  $n=10$ , it is equal to 2 s, and so on. The MA parameters were chosen empirically according to the results obtained with preliminary numerous tests. They are as follows:

1. Size of the population depends on the problem size:  $SP = 4\sqrt{n}$ .
2. Percent of solutions selected for crossover  $TP=50\%$ .
3. Crossover probability  $CP=0.8$ .
4. Mutation probability  $MP=0.1$ .

#### 6.2. Methods used for comparison

In order to evaluate our MA, we compared it with the Dynamic Program (DP) described in Dolgui et al. (2005) and with a Steepest Descent (SD) algorithm based on the neighborhood defined in Section 5.5: SD algorithm begins with an initial solution, obtained using the greedy algorithm G1; then, we apply the LS procedure.

The difference with the procedure described in Section 5.5 is in the fact that the process is continued as long as the solution can be improved. Thus, the SD algorithm stops when a local maximum is reached.

6.3. Limits of DP procedure

In Table 1, the experimental results for the DP are presented. More precisely, the number of instances solved to optimality by the DP for  $n \in [4, 13]$  and CPU time values are reported. Calculation time of DP was limited to 1 h. One can easily see that the DP successfully solved only small size problems. For the instances with  $n=7$  lots, 15 examples were not solved within the time limit. For  $n=8$  lots and more, DP usually failed to find a solution because of a lack of computer memory. In the fifth, sixth and seventh columns of this table, the minimum, average and maximum running times of the DP algorithm are reported. All resulting CPU times were rounded to two significant decimals. CPU time is very different for problems of an equivalent size, and depends on the instance data.

Generally speaking, the DP algorithm provides exact solutions, but it is not capable to treat problems with more than 13 lots. This represents a serious drawback when using the DP to resolve industrial problems. Actually, even for problems with as few as only eight lots, less than 40% of the instances could be solved. In addition, the average CPU time consumed for instances solved could be a problem for a practical use within the decomposition procedure which implies solving  $n$  different lot-sizing sub-problems.

**Table 1**  
CPU time and number of instances resolved to optimality for DP.

Number of lots	Number instances solved	Number of non-solved instances		CPU time (s)		
		Limit of time	Memory problem	Min	Average	Max
4	160/160	-	-	< 0.01	0.42	2.08
5	160/160	-	-	< 0.01	6.40	60.56
6	160/160	-	-	< 0.01	95.34	724.03
7	143/160	15	2	< 0.01	816.26	3591.29
8	58/160	-	102	< 0.01	600.38	3506.12
9	44/160	1	115	< 0.01	347.92	2239.07
10	32/160	-	128	0.01	269.57	2001.53
11	29/160	-	131	0.01	232.36	1828.68
12	21/160	1	138	< 0.01	177.81	1198.31
13	15/160	-	145	0.01	295.43	2547.10

**Table 2**  
Results of LS and MA for  $n \in [4, 13]$  versus optimal solutions obtained with DP.

Number of lots	Number of tested instances	Memetic Algorithm (MA)	Local Search (LS)	Relative errors (in %) of solutions			
				CPU time (s)		Relative errors (in %) of solutions	
				Average	Maximum	MA	LS
4	160	0.01	0.01	0.328	2.16	0.488	3.93
5	160	0.01	0.01	0.257	1.96	0.482	5.17
6	160	0.02	0.01	0.191	0.87	0.390	8.93
7	143	0.02	0.01	0.211	3.00	0.725	9.41
8	58	0.03	0.02	0.168	2.00	0.807	9.13
9	44	0.03	0.02	0.272	3.80	1.066	20.92
10	32	0.05	0.02	0.167	2.40	0.800	11.3
11	29	0.06	0.02	0.157	2.47	0.989	19.69
12	21	0.06	0.03	0.109	2.39	0.789	13.59
13	15	0.08	0.03	0.094	2.30	0.774	35.28

6.4. MA and LS results versus optimal solutions

For problems with a small number of lots, it is possible to compare solutions obtained by the MA and LS with the exact solutions using the DP from Dolgui et al. (2005). Experimental results, for instances with number of lots from 4 to 13, are presented in Table 2.

Column two shows the quantity of instances for which this comparison were possible (i.e. quantity of instances resolved by the DP). In the third and fourth columns of this table, the running time in seconds of MA and LS are reported. As the running time of MA was limited by  $0.2n$ , so the time given in the corresponding column is the average time of five runs of each problem instance until the moment when the best solution was found. Both methods take little time to find their best solutions.

Columns 5–8 present the quality of the solutions with the MA and LS. Values reported in these columns are the relative errors (in percentage), obtained as follows:

$$\frac{\text{exact\_sol(DP)} - \text{approximative\_sol(MA/LS)}}{\text{exact\_sol(DP)}} 100\%$$

for instances where the DP was capable to obtain an exact solution. The “average relative error” is the average of errors for all solutions obtained using a given optimization approach for instances of given size resolved by the DP. The “maximum relative error” represents the maximal relative error obtained with a corresponding approach. The average quality of solutions (column five for MA and column seven for LS) is very high, especially for the MA. As shown, in the worst case, the average value of relative error is only 0.328% from optimum that is a very good result. The same values for the LS are ostensibly worse. If we look at the maximum errors, for the MA, in the worst case, we have the relative error of 3.8%, but for the LS, it can be as much as 35.28%, i.e. about ten times as bad.

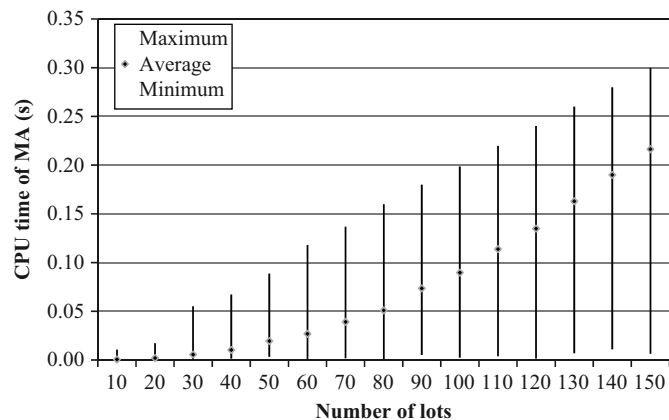
6.5. Comparison of MA with LS for large scale problems

Table 3 demonstrates average running time of MA and LS for instances with the number of lots from 10 to 150. Remember, for the MA, five independent runs for each of 160 instances for each problem size were effectuated. For the MA, two values are reported: (i) average calculation time under condition of a fixed time limit, in column two; and (ii) average time needed to find the best solution, in column three. For the LS, only the average calculation time is reported. One can see that while the LS found its local optima quicker than the MA, nevertheless CPU time remain fully compatible with a practical use on instances up to 150 lots for both methods.

It is also interesting to see that, for the MA, the variation of calculation time among different instances (see Fig. 6) was quite small. This figure demonstrates how the minimal, average and

**Table 3**  
Average running time of MA and LS for  $n \in [10, 150]$ .

Number of lots	MA		LS
	CPU time (s) (under limited time)	Time (s) to achieve the best solution obtained	CPU time (s)
10	2.000	0.045	0.021
20	3.999	0.185	0.071
30	5.998	0.546	0.153
40	7.996	1.018	0.313
50	9.993	1.936	0.500
60	11.990	2.677	0.764
70	13.988	3.903	1.139
80	15.983	5.081	1.551
90	17.979	7.339	2.222
100	19.973	8.959	2.729
110	21.970	11.370	3.786
120	23.964	13.475	4.431
130	25.953	16.281	5.375
140	27.944	18.988	6.505
150	29.931	21.623	8.112



**Fig. 6.** Variation of CPU time for MA.

**Table 4**  
Comparison of obtained solutions for MA, LS, G1, G2 and G3 (160 instances for each series).

Number of lots	LS	MA	% Of cases when the MA solution is better than the LS solution	Heuristic algorithms			
				G1	G2	G3	
Average fitness value				Average fitness value		Average fitness value	% of solutions with non-zero probability
10	0.7311	0.7326	32.5	0.728	0.536	0.416	48.125
20	0.6250	0.6270	37.5	0.621	0.532	0.353	41.25
30	0.5520	0.5541	43.75	0.548	0.491	0.262	32.5
40	0.5264	0.5283	44.375	0.522	0.490	0.296	33.75
50	0.4594	0.4614	54.375	0.455	0.424	0.251	28.75
60	0.4377	0.4398	53.125	0.434	0.408	0.261	30
70	0.4206	0.4223	54.375	0.416	0.398	0.206	25
80	0.4187	0.4206	55	0.415	0.397	0.233	27.5
90	0.4273	0.4291	55	0.423	0.405	0.225	26.875
100	0.3960	0.3978	57.5	0.393	0.377	0.257	30
110	0.4069	0.4084	56.25	0.402	0.389	0.232	28.125
120	0.3862	0.3877	59.375	0.382	0.369	0.215	25.625
130	0.3615	0.3628	63.125	0.358	0.345	0.232	28.125
140	0.3447	0.3459	64.375	0.340	0.328	0.209	25.625
150	0.3492	0.3502	61.25	0.345	0.335	0.22	26.875

maximal CPU time of MA augments when the size of problem increases. We can observe that the maximal curve, which characterizes the relation between the CPU time and the number of lots, is quite linear.

Table 4 compares the effectiveness of approaches in terms of the solution's quality. In columns two and three we report the average fitness values obtained respectively by LS and MA. Results for LS correspond to the average result among the 160 instances whereas for MA, due to the stochastic character of the algorithm, we report the average result among the 160 instances and the five independent runs completed for each instance. Remember that each solution of the problem is a probability, i.e. a value between zero and one. Note that the average values with MA are always greater than the average values of LS. Column four indicates the percentage of instances in which the MA provides a better solution than the LS. It is interesting to note that this percentage tends to increase with the number of lots.

Overall, from 2400 instances tested, the average results obtained on five runs of the MA are greater than the corresponding results of the LS for 1267 instances and smaller for six instances only.

Columns 5–8 report the results of the heuristic algorithms G1–G3 (in the MA these algorithms are used to generate the initial population). First of all, note that G1 and G2 have created solutions with non-zero fitness for all problem instances, while algorithm G3 was only able to create such a solution for 25% to 48% of tests on average (see the last column of the table), which can be explained because heuristic G3 does not ensure to generate solutions that respect the condition of Eq. (12). In such cases, zero was used to compute the average value of fitness. This is why, the average results for algorithm G3 (column seven) appear lower than average results in columns two and three. However, when G3 provides a solution with a non-zero probability, its fitness is usually on line with those of G1 or G2. If we compare G1–G3, the average results for the first heuristic is better for all sizes of lots, and these values are relatively not very far from the averages results of the MA and LS.

Based on the tests provided for three solution approaches – DP, MA and LS – it can be concluded that the first can only be used for small size problems because of high CPU time and memory deficiency, whereas both MA and LS can resolve industrial size problems in a reasonable time. Solution quality comparison accomplished for instances up to 13 lots shows that solutions

provided by MA are of a better quality than those of LS; which is also true for the problems with a higher number of lots. The MA is a relatively stable method providing high quality solutions; coupled with an existing method to solve the TSP problem, they will form a general approach capable to effectively resolve initial lot-sizing and sequencing problems.

## 7. Conclusions

A real-life problem of optimal lot-sizing and sequencing for a production line with random breakdowns and rejects was studied. The line considered manufactures intermediate components of different types for subsequent assembly into modules. The problem is to choose sequences and lot sizes. The objective is to maximize the probability to have a sufficient number of components by the end of a given planning horizon, i.e. maximize the overall service level. The benefit of this optimization is evident, because without any additional resources, production cost can be reduced by limiting the stoppages for the assembly line that follows.

With an optimal decomposition procedure which uses a complete enumeration to search for the optimal last lot, sequencing and lot-sizing decisions can be considered separately. The sequencing sub-problem can be reduced to the well studied Asymmetric Traveling Salesman Problem and thus be solved with known methods.

For lot-sizing, a local search and a memetic algorithm were proposed. Some experimental results were shown and discussed. The algorithms developed were compared with a dynamic programming procedure for small size instances and between them for large size problems. The MA and LS developed can find good solutions for large problems and thus this approach can be applied to large scale industrial problems.

Future work may entail using simulation methods to replace the evaluation function (fitness) in order to consider problems with various probability distributions or integrating other uncertainty phenomena (e.g. uncertain manufacturing time). For example, by using simulation we could study problems in which the quantity and/or seriousness of breakdowns increases with the age of machines, etc. It will be interesting also to develop a metaheuristic approach to resolve the entire problem without decomposition and compare the results with and without decomposition.

## Acknowledgments

The authors thank Chris Yukna for his help with English.

## References

- Agnihotri, S., Lee, J.S., Kim, J., 2000. Lot sizing with random yields and tardiness costs. *Comput. Oper. Res.* 27, 437–459.
- Allahverdi, A., Ng, C.T., Cheng, T.C.E., Kovalyov, M.Y., 2008. A survey of scheduling problems with setup times and costs. *Eur. J. Oper. Res.* 187, 985–1032.
- Arda, Y., Hennet, J.-C., 2006. Inventory control in a multi-supplier system. *Int. J. Prod. Econ.* 104 (2), 249–259.
- Chakraborty, T., Giri, B.C., Chaudhuri, K.S., 2009. Production lot sizing with process deterioration and machine breakdown under inspection schedule. *Omega* 37, 257–271.
- Chen, R.S., Lu, K.Y., Yu, S.C., 2002. A hybrid genetic algorithm approach on multi-objective of assembly planning problem. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 15 (5), 447–457.
- Cheng, T.C.E., Wang, X., 2010. Machine scheduling with job class setup and delivery considerations. *Comput. Oper. Res.* 37, 1123–1128.
- Chiu, S.W., 2010. Robust planning in optimization for production system subject to random machine breakdown and failure in rework. *Comput. Oper. Res.* 37, 899–908.
- Choi, I.-C., Kim, S.-I., Kim, H.-S., 2003. A genetic algorithm with a mixed region search for the asymmetric traveling salesman problem. *Comput. Oper. Res.* 30 (5), 773–786.
- Cox, E., 2005. Fuzzy Modeling and Genetic Algorithms for Data Mining and Exploration. Morgan Kaufmann, pp. 343–420.
- Dellaert, N., Jeunet, J., Jonard, N., 2000. A genetic algorithm to solve the general multi-level lot-sizing problem with time-varying costs. *Int. J. Prod. Econ.* 68, 241–257.
- Dolgui, A., 2002. Performance analysis model for systems described by renewal process. *Electron. Modeling* 24 (2), 3–11.
- Dolgui, A., Levin, G., Louly, M.-A., 2005. Decomposition approach for a problem of lot-sizing and sequencing under uncertainties. *Int. J. Comput. Integ. Manuf.* 18 (5), 376–385.
- Dolgui, A., Prodron, C., 2007. Supply planning under uncertainties in MRP environments: a state of the art. *Annu. Rev. Control* 31, 269–279.
- Dolgui, A., Proth, J.-M., 2010. Supply chain engineering: useful methods and techniques. Springer, London.
- Dolgui, A., Kovalyov, M.Y., Shchamaliyova, K., 2011. Multi-product lot-sizing and sequencing on a single imperfect machine. *Comput. Optim. Appl.* 50 (3), 465–482.
- Emmons, H., Mathur, K., 1995. Lot sizing in a no-wait flow shop. *Oper. Res. Lett.* 17, 159–164.
- Gaafar, L., 2006. Applying genetic algorithms to dynamic lot sizing with batch ordering. *Comput. Ind. Eng.* 51, 433–444.
- Gerchak, Y., Wang, Y., Yano, C.A., 1994. Lot sizing in assembly systems with random yields. *IIE Trans.* 26 (2), 19–24.
- Giri, B.C., Dohi, T., 2004. Optimal lot sizing for an unreliable production system based on net present value approach. *Int. J. Prod. Econ.* 92, 157–167.
- Giri, B.C., Yun, W.Y., 2005. Optimal lot sizing for an unreliable production system under partial backlogging and at most two failures in a production cycle. *Int. J. Prod. Econ.* 95, 229–243.
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
- Guu, S.M., Liou, F.R., 1999. An algorithm for the multiple lot sizing problem with rigid demand and interrupted geometric yield. *J. Math. Anal. Appl.* 234, 567–579.
- Guu, S.M., Zhang, A.X., 2003. The finite multiple lot sizing problem with interrupted geometric yield and holding costs. *Eur. J. Oper. Res.* 145, 635–644.
- Haji, R., Haji, A., Sajadifar, M., Zolfaghari, S., 2008. Lot sizing with non-zero setup times for rework. *J. Syst. Sci. Syst. Eng.* 17 (2), 230–240.
- Hernandez, W., Suer, G.A., 1999. Genetic algorithms in lot sizing decisions. *Proc. IEEE Conf. Evol. Comput.* 3, 2280–2286.
- Hnaien, F., Delorme, X., Dolgui, A., 2009. Genetic algorithm for supply planning in two-level assembly systems with random lead times. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 22 (6), 906–915.
- Holland, J., 1975. Adaptation in natural and artificial systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Inderfurth, K., 2009. How to protect against demand and yield risks in MRP systems. *Int. J. Prod. Econ.* 121, 474–481.
- Jaber, M.Y., Khan, M., 2010. Managing yield by lot splitting in a serial production line with learning, rework and scrap. *Int. J. Prod. Econ.* 124, 32–39.
- Lee, H.L., Sikora, R., Shaw, M.J., 1997. A Genetic algorithm-based approach to flexible flow-line scheduling with variable lot sizes. *IEEE Trans. Syst., Man Cybern., Part B* 27 (1), 36–54.
- Li, Q., Xu, H., Zheng, S., 2008. Periodic-review inventory systems with random yield and demands: bounds and heuristics. *IIE Trans.* 40, 424–444.
- Lin, G.C., Gong, D.-C., 2006. On a production-inventory system of deteriorating items subject to random machine breakdowns with a fixed repair time. *Math. Comput. Model.* 43, 920–932.
- Maddah, B., Moussawi, L., Jaber, M.Y., 2010. Lot sizing with a Markov production process and imperfect items scrapped. *Int. J. Prod. Econ.* 124, 340–347.
- Meyr, H., 2000. Simultaneous lot sizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. *Eur. J. Oper. Res.* 120, 311–326.
- Moscato, P., 1989. On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts: Towards Memetic Algorithms. Technical Report Caltech Concurrent Computation Program. Report 826.
- Öncan, T., Altinel, I.K., Laporte, G., 2009. A comparative analysis of several asymmetric traveling salesman problem formulations. *Comput. Oper. Res.* 36 (3), 637–654.
- Pierrelval, H., Caux, C., Paris, J.L., Viguier, F., 2003. Evolutionary approaches to the design and organization of manufacturing systems. *Comput. Ind. Eng.* 44 (3), 339–364.
- Potts, C.N., Van Wassenhove, L.N., 1992. Integrating scheduling with batching and lot-sizing: a review of algorithms and complexity. *J. Oper. Res. Soc.* 43 (5), 395–406.
- Radhoui, M., Rezg, N., Chelbi, A., 2009. Integrated model of preventive maintenance, quality control and buffer sizing for unreliable and imperfect production systems. *Int. J. Prod. Res.* 47 (2), 389–402.
- Rezaei, J., Davoodi, M., 2011. Multi-objective models for lot-sizing with supplier selection. *Int. J. Prod. Econ.* 130 (1), 77–86.
- Said, Y.H., 2005. On genetic algorithms and their applications. *Handbook of Statistics* 24, 359–390.
- Singh, M.R., Abraham, C.T., Akella, R., 1988. Planning production of a set of components when yield is random. In: Proceedings of the Fifth IEEE/CHMT Conference, pp. 196–200.
- Supithak, W., Liman, S.D., Montes, E.J., 2010. Lot-sizing and scheduling problem with earliness tardiness and setup penalties. *Comput. Ind. Eng.* 58 (3), 363–372.

- Teunter, R.H., Flapper, S.D.P., 2003. Lot-sizing for a single-stage single product production system with rework of perishable production defectives. *OR Spectrum* 25, 85–96.
- Wang, Y., Gerchak, Y., 2000. Input control in a batch production system with lead times, due dates and random yields. *Eur. J. Oper. Res.* 126, 371–385.
- Xing, L.-N., Chen, Y.-W., Yang, K.-W., Hou, F., Shen, X.-S., Cai, H.-P., 2008. A hybrid approach combining an improved genetic algorithm and optimization strategies for the asymmetric traveling salesman problem. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 21 (8), 1370–1380.
- Yao, M.J., Huang, J.X., 2005. Solving the economic lot scheduling problem with deteriorating items using genetic algorithms. *J. Food Eng.* 70, 309–322.
- Yano, C.A., Lee, H.L., 1995. Lot sizing with random yields: a review. *Oper. Res.* 43 (2), 311–333.
- Zhu, X., Wilhelm, W.E., 2006. Scheduling and lot-sizing with sequence-dependent setup: a literature review. *IIE Trans.* 38, 987–1007.

# Manufacturing network simulation using a data driven model

**Mohand Essaid\*, Frédéric Grimaud and Patrick Burlat**

Division of Industrial and Computer Sciences, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

158, Cours Fauriel. 42023 Saint-Étienne cedex 2. France

\*E-mail: [essaid@emse.fr](mailto:essaid@emse.fr)

**Abstract:** The globalization of markets and world-wide competition forces manufacturing enterprises to enter into alliances leading to the creation of distributed manufacturing enterprises. Before forming a partnership it is essential to evaluate viability of proposed manufacturing network. Simulation provides an attractive tool to make decisions on such situations. However, due to its complexity and high cost and time consumption, simulation failed to gain a wide acceptance from industrial users. This paper presents a generic simulation model which attempt to create reusable enterprises modules for evaluating supply chain performance. The simulation is developed using ARENA software, it is coupled with spreadsheet configuration tool. The latter permits a data driven approach for simulation instances creation. Manufacturing layout type, demand response strategy, production management policy and manufacturing effectiveness level are the constituents of the model instantiation. These aspects constitute a manufacturing library from which various configurations of supply chain can be implemented and simulated. The tool is tested in a make to stock environment to evaluate supply chain configurations when enterprises of different effectiveness levels and management policies are cooperating.

**Keywords:** manufacturing network, simulation, enterprise effectiveness

**Reference** to this paper should be made as follows: Mohand Essaid, Frédéric Grimaud and Patrick Burlat. (2008) 'Manufacturing network simulation using a generic enterprise model', *Int. J. Simulation and Process Modelling*, Vol. x, Nos. 1/x/x, pp.xx-xx.

**Biographical notes:** Mohand ESSAID graduated in 2004 with an industrial engineering degree from Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algeria. He earned a Master Degree in Management Scientific Methods from University Paris Dauphine in 2005, France. His is currently a PhD student in Industrial and Computer Sciences Division at Ecole des Mines de Saint Etienne.

Dr. Frédéric GRIMAUD, M.Sc. and Ph.D. in Computer Science, Associate Professor and Associate Director of the Industrial Engineering and Computer Sciences Centre at the Ecole des Mines de Saint-Etienne . He is responsible of Computer-Aided Production Systems courses. His research has focused on supply chain simulation and optimization.

Pr. Patrick Burlat graduated in 1986 with an engineering degree from Ecole Supérieure d'Electricité (Supelec) in France. He earned a Master Degree in Management from University of Paris La Sorbonne in 1990, a PhD in Economics from University of Lyon in 1996, and a Habilitation for thesis supervision in 2002. After working for five years as Production Engineer at Schlumberger Industries, he joined the Ecole des Mines de Saint Etienne in 1992 where he is currently full Professor and head of department. His research interests lie in the development of decision support systems and diagnostic tools to improve the performances within networks of enterprises.

---

## 1 INTRODUCTION

---

Over the last few decades, the nature of competition in many business environments has been changing, from competition between companies to competition between supply chains. Effective management of the supply chain has become a challenge for the competitiveness of enterprises. Faced with shorter life cycles of products and volatile markets, managing logistical projects in the short term requires prior appraisal of supply chain performance. To evaluate the behaviour of a supply chain and be able to measure aspects of connectivity of its processes, modelling enterprise processes is necessary. There are several modelling approaches to study supply chains. The most commonly used approaches are: analytical, hybrid, multi-agent systems and simulation models. Simulation is an important tool to analyse supply-chain behaviour; typically in terms of throughput, cost, delivery reliability and variability. At the supply-chain design stage, simulation allows possible supply-chain configurations to be tested against different future supply-chain scenarios.

Due to the organization of the production process, management methods used, some types of businesses are better connected to other types. But in a logistic project, finding adequate partners are not always obvious. That is why it is interesting to study the various possible associations between different company profiles to detect inefficient links and improve them by means of coordination mechanisms such as information sharing and Vendor Inventory Management.

The simulation model developed in this paper is based on a generic model of manufacturing enterprise. The implementation of the simulation model is used to treat different configurations of supply chains. Taking account of different levels of organizational maturity and management systems enables analysis of the adequacy of production systems implemented in a manufacturing network.

The model allows data driven instantiation using different attributes. The instantiation is done by a configuration tool in several stages. As a first step, choice of manufacture type (transfer, assembly or postponement) is used to configure the structure of the product flow in the supply chain. Secondly, the choice of the demand response strategy (Make To Stock, Assemble To Order, Make To Order) allows positioning for each company in the chain, of the order decoupling point. Thus, management policies based on information on inventory and those based on information on the customer request will be compared. The operations management can be like Kanban, Replenishment Order Point (ROP) and Material Requirement Planning (MRP).

Once established management system, this means setting the parameters of its operation. A classification of enterprises according to their level of effectiveness allows calibration of these parameters. The configuration tool is developed using spreadsheets. For each effectiveness class, various instances can be generated. The variables used to characterize the enterprise classes are computed using the overall equipment effectiveness (OEE). Thus, manufacturing parameters such

as: set up, changeover, breakdown times, scrap ratio, etc, are used to configure the manufacturing processes.

The paper is organised as follows. In the second section, a brief state of the art on the issues of the supply chain management is given. Simulation based models are especially discussed. The emphasis is on the lack of genericity of simulation models and how one can address them. In the third section, we describe the simulation model and the configuration approach. The simulator developed using ARENA software, will be briefly described, as well as the logistics chains configurations can be simulated. Section four demonstrates the simulation experiment conducted and the results obtained. Section five summarises the results implications and highlights some future researches.

---

## 2 SIMULATION IN THE SUPPLY CHAIN CONTEXT

---

The supply chain is “a network of connected and interdependent organisations mutually and co-operatively working together to control, manage and improve the flow of material and information from suppliers to end users” (Christopher, 1998). The supply chain thus comprises a number of suppliers interconnected by information and material flows. Unfortunately, supply chains do not always behave as expected, due to the complexity of interconnections and variability in both the performance of suppliers and the links between them. While supply chain activities enable specialisation and economies of scale, many important issues and problems need to be resolved for successful supply chain operations (Trkman et al, 2007).

Supply chain management is the integration of key business processes from end user through original suppliers that provide products, services, and information that add value for customer and other stakeholders (Chan and Qi, 2003). Most supply chain management related problems derive from either uncertainties or an inability to co-ordinate several activities and partners (Turban et al., 2004).

### 2.1 Supply chain modelling

Due to the organization of the production process, management methods used, some types of businesses are better connected to other types. But in a logistic project, finding adequate partners is not always obvious. That is why it is interesting to study various possible associations between different company profiles to detect inefficient links and try to improve them by means of coordination mechanisms.

Some researches attempt to address the problem of choice and coordination of logistic partners. For example (Lin and Chen, 2004) proposed a methodology based on the fuzzy subsets for measuring proximity between companies using a large number of attributes. (Pedersen and Van der Berg, 2001) based their study on the concepts of skills alliance and collaboration of companies. In the same vein, (Fisher et al, 2004) have developed an algorithm for the construction of clusters of skills and measure connectivity and eccentricity between these clusters.

Nevertheless, these works do not address the problem of evaluating the performance of logistic networks formed by heterogeneous profiles companies. (Smits et al, 2006) stressed that the level of integration in a supply chain is very linked to the notion of connectivity, which affects the performance of the supply chain. To clarify the relationship between connectivity, the integration and performance of a manufacturing network, the authors have raised these concepts in a case study of network of SMEs. They stressed that the performance of the chain can be great without there being a high level of connectivity in terms of information technology (interoperability of Information Systems); provided that this is offset by a connectivity of process, products and organizations.

There are several methods for analyzing and evaluating supply chains. (Harrel and Tumay 1994), classified supply chain models into two basic categories: methods for solution evaluation and methods for solution generation. The first category evaluates the possible configurations of a supply chain design in What-If scenarios. The second category will generate the best configuration for a given objective or set of objectives. In the first group, spreadsheet- based analysis and Simulation (discrete event and systems dynamics simulation) are perhaps the most frequent occurrences, while the other group includes techniques such as Classical Optimization Methods (e.g., Integer and Dynamic Programming) (Chwif and Barretto, 2002).

## 2.2 Supply chain simulation approaches

Simulation is the process of designing and creating a model of a real or proposed system, using abstract objects in an effort to replicate the behaviour of their real-world equivalents (Kim et al, 2004).

A supply chain simulation model should be built by integrating models of manufacturing and logistics systems. These component models include sub-models of the business processes and information flows in addition to the material flow (Banks and Buckley, 2002).

The value of simulating a supply chain resides in the fact of taking into account both stochastic and dynamic behaviour. This makes simulation an ideal tool for analyzing supply chains because these systems can exhibit very complex dynamical behaviour (Anderson and Morrice, 1999).

Making it possible to explore policies and operating procedures is one of the greatest advantages of simulation (Banks, 1998). This ability to evaluate “what if” scenarios with a variety of inputs could make simulation a useful technique for analyzing supply chains (Hellström, and Johnsson, 2002).

(Terzi and Cavalieri, 2004), (Wyland et al, 2000) argue that the increasing popularity of simulation as a tool in supply chain management is due to its strength in evaluating system variation and interdependencies. This enables a decision-maker to assess changes in part of the supply chain and visualise the impact of those changes on the other parts of the

system, and ultimately on the performance of the entire supply chain.

Kleijnen (2005) provides a general survey of supply-chain simulation work, identifying four types of simulation:

- spreadsheet,
- system dynamics,
- discrete-event,
- business games.

A discrete-event simulation is one in which the state of a model changes at only a discrete, but possibly random, set of simulated time points (Schriber and Brunner, 2005). Discrete-event simulation programming languages contain capabilities for: maintaining a list of events scheduled to be executed as time evolves, maintaining other dynamical data structure, generating pseudorandom numbers, computing summary statistics including time average and variances, etc. (Fishman, 2001). Discrete-event simulation is one of the most popular modelling techniques (Robinson, 2005). This technique is hence mostly used to analyse supply chains and manufacturing networks.

(Feigin et al. 1996), (Kumar et al. 1993), (Maloni and Benton 1997) and (Towill et al. 1992) used simulation techniques to evaluate effects of various supply chain strategies on demand amplification. (Tzafestas and Kapsiotis, 1994) utilized a combined analytical/simulation model to analyze supply chains. (Swaminathan, et al, 1995) utilized a simulation to study the effect of sharing supplier’s available-to-promise information. (Ng et al. 2003) described the development of a simulation workbench for modelling and analysing multi-echelon supply chains. The workbench facilitates study of inventory and forecasting policies practised by the echelons, and modelled different information exchange mechanisms adopted by them.

Simulation has been used to model supply chains in various industrial sectors including computer manufacturing (Bagchi et al, 1998) (Ingalls and Kasales 1999), mobile communication systems (Persson and Olhager, 2002), the aerospace industry (Bilczo et al, 2003), food (Reiner and Trcka, 2004), apparel (Al-Zubaidi and Tyler, 2004) and semiconductor manufacturing (Sarjoughian et al, 2005).

(Swaminathan, 1998) highlighted the limitations of many simulation tools in the sense that they are dedicated to specific cases and problems, and are therefore not very reusable. They proposed an approach based on multi-agent systems with an object-oriented modelling to make up for those limitations of genericity simulation models. To the same end, (Chan and Rossetti, 2003) have developed an object-oriented modelling approach to implement a platform for the simulation of supply chains. The tool can generate, from components, various scenarios of supply chains, with a system of relational databases allowing easy instantiation. (Hung et al, 2004) have developed an approach using generic blocks (generic nodes) and test various types of operations management policies. (Byrne and Heavy, 2004) simulated supply chain management policies in the field of SME networks. (Enns and Suwanruji, 2006) summarized simulation studies comparing replenishment strategies under

various demand patterns and different levels of uncertainty and capacity constraints. (Pundoor and Herrmann, 2006) proposed a more generic model using the Supply Chain Operations Reference (SCOR) methodology. Given the fact that there are no standard components in simulation models of supply chains, they have mobilized the SCOR model to implement a hierarchical simulation tool with sub reflecting the different activities of the supply chain. The level of detail allows selection of different characteristics without being specific to one type of industry. (Umeda and Lee, 2004) described a design specification for a generic supply chain simulation system. This latter is based on schedule-driven and stock-driven control methods to support the supply chain management. They also discussed interface data requirements for the proposed supply chain simulation. (Labarthe et al., 2007) have developed a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in mass customization environments.

In discrete-event simulation approaches, the construction and use of a model is a complex, multi-stage, iterative process. This process has been described by many authors, for example, Law and Kelton (2000). The main stages of the process may be summarised as conceptual modelling, model coding, experimentation and implementation (Robinson, 2004). Within each stage, and between stages, it is essential that appropriate quality control processes of validation and verification are undertaken thoroughly so that the users can be confident that the models, and the results obtained from it, adequately represent the behaviour of the real or proposed system. Once a valid model and valid data are available, the model can be run to generate results on the behaviour and performance of the real or proposed system of interest i.e. on a supply-chain scenario (Tannock et al. 2007).

### 2.3 Discussions and limits

Note that generic models are often directed towards the creation of logistic entities (manufacturers, distributors, carriers, etc.), and information connection between these entities. However, the modelling of production processes lack of genericity. A number of crucial concepts studied in the literature on the design and management of supply chains, are slightly raised in simulation approaches. Consider for example, customer demand response strategy, this concept related to the customer decoupling point position, is very usable in mass customization environments. From an informational point of view, the decoupling point reflects the degree of visibility of demand information along the supply chain and hence impacts the flow management (bullwhip effect). This is an interesting issue to be included in supply chain simulation scenarios.

The concepts of push / pull management, systems of planning and control for their implementation, resource capacity (bottlenecks), flexibility, and Agile / Lean concepts, are all important elements that have an impact on the flows into supply chains. That is why we will try to incorporate some of these elements in a generic conceptual model, which will be instantiated according to different attributes relating to these

elements. The aim is to develop a manufacturing typology which can be used as a database for simulation scenarios generation.

Another issue of supply chain simulation methods is that when the modelled system is a proposed one, input data must be adequately chosen so that the model reflects reality. In this perspective, constructing manufacturing library classes may be an adequate method to insure the validity of simulation data. Indeed, the ability to implement various enterprises profiles guarantees the validity of scenarios and results. One of the consistent ways to construct this enterprises library is to use appropriate manufacturing metrics in a data driven approach. This may be a helpful tool to classify enterprises to be incorporated in the supply chain. Enterprises can be classified according to three main axes: layout profile, maturity level, and management policies. The first axis is represented by the manufacturing shop floor type and the products structures. The second axis can be constructed using effectiveness level. Our approach considers four effectiveness levels by using the framework developed by (Miltenburg, 1995). The author distinguishes four levels of manufacturing maturity: infant, industry average, adult and world class, afterwards, we note these classes: A, B, C and D. The metric used for effectiveness level classification is overall equipment effectiveness (OEE); (Nakajima, 1989), (Johnson and Lesshammar, 1999).

The management policy axis is modelled by the planning and control system used to manage production operations. At the high level demand response strategy can be modelled to distinguish the three main production environments: make to stock, make to order and assemble to order. At the middle level, the operations management policy is to be chosen from the well-known Kanban, ROP or MRP planning methods. At the scheduling level, priority rules such as first in first out, delivery due date are to be used to manage the different products queues.

The manufacturing library contains company profiles which will be integrated into different configurations of supply chains. The goal is the generation of knowledge on the behaviour of manufacturing networks and connectivity of its constituents. The analysis and benchmark of supply chain configurations is conducted using simulation software, coupled with a spreadsheet input data tool. The simulation outputs concern average inventory in the supply chain, resources utilization, and delivery delay to the end customer.

---

## 3. SUPPLY CHAIN SIMULATION MODEL

---

### 3.1 Manufacturing conceptual model

Modelling several manufacturing systems using one generic model is a difficult task. The manufacturing processes are depending on the product complexity, the shop floor arrangement, the automation of operations, etc. To insure model genericity, a choice of appropriate abstraction level is necessary. However, some aspects relevant to logistic operations must be considered. Manufacturing processes can

be aggregated into macro-processes. By doing this, we focus on lead times of manufacturing processes, without detailing operations and product routes in the shop floor. So, considering two macro-processes, decoupled with a work in progress stock point, is sufficient to model material flow of most discrete manufactures. The conceptual enterprise model is composed of:

- Two macro-processes which reproduce the physical transformation processes from raw material to semi-finished goods and then into finished goods. The production process can be a transfer, assembly, or postponement operation. In addition, production resources and capacities are modelled within this process
- Three potential planning points: these are found in flow control. They are three potential stock positions (procurement, manufacturing and delivery). These points can represent flow synchronisation positions or may be used to incorporate the external demand information in the production planning. In the latter case, we use the decoupling point concept to model the three main demand response strategies: Make To Stock, Assemble To Order and Make To Order
- A planning and control system: this models the policies and rules used to manage the production operations. The well-known reorder replenishment point (ROP), kanban and material requirement planning (MRP), can be used.

Figure 1 illustrates the manufacturing conceptual model developed.

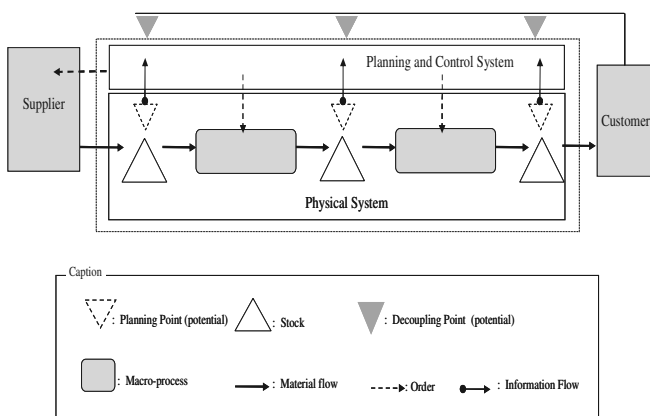


Figure 1 Manufacturing conceptual model

Implementation of the conceptual model is done using ARENA simulation software. The modelling approach consists of creating ARENA bloc stations. Using an appropriate numbering for these stations, some attributes are

then calculated to code production and inventory variables according to the enterprise position in the supply chain. Hence, these attributes can be changed without reconfiguring the tool. The model is composed of sub-models which represent the processes (operations management processes and manufacturing and handling processes).

The model of the supply chain includes a supplier, three companies and a final customer. Two product flows can be treated. This will take into account the assembly process and differentiation (postponement strategy). Thus, the problems of synchronisation of products routing can be studied. A process can be physical or a control one. Three types of physical processes are considered: supply, processing and delivery. Processing is the succession of two macro-processes (described above), which can be transfer, assembly or differentiation. The second type of process is control. This relates demand response strategies (MTS, ATO and MTO) and planning policies (ROP, Kanban, and MRP). A control process activates a planning point which control storage points of material and drives the physical process. Between two companies in the chain, coordination mechanisms can be put in place. They are particularly flow coordinating mechanisms through exchange of information (forecasts, production information, etc) and adjustment of enterprise management parameters (e.g. changing the inventory reorder point according to the variability of demand).

Figure 2 summarizes the supply chain model using a UML class diagram (Unified Modelling Language).

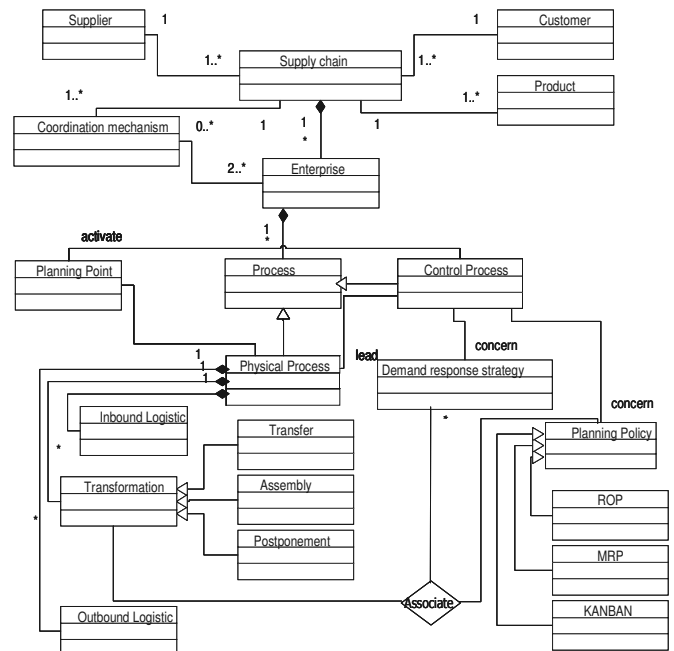


Figure 2 UML class diagram supply chain model

### 3.2 Configuration tool

To make easy the instantiation of the model and the simulation scenarios creation, a configuration tool is developed using excel worksheets.

This tool is used for checking and validating consistency of input data. The instantiation of the model is done in several stages. At each step the user provides a number of parameters. The tool checks via rules of consistency the validity of data entered and return configuration parameters or an error message if the data fail to comply with these rules. The rules of consistency among other concerns:

- The flow of products: for example, that verify whether a differentiation manufacturing type is made at a level of the chain, the two flows of goods will not be assembled (since these are two flows of product variants and not two components)
- Management methods: depending on the enterprise class (level of effectiveness), verify that management parameters are adequate (for example prohibit the application of a kanban method for a company with high rates of scrap and breakdowns)

When the user enter technical and management data, this information are structured and validated to create the parameters that will be used to the configuration of the supply chain in the computing step. The configuration is then validated to be simulated. The UML activity diagram in Figure 3 describes the configuration process.

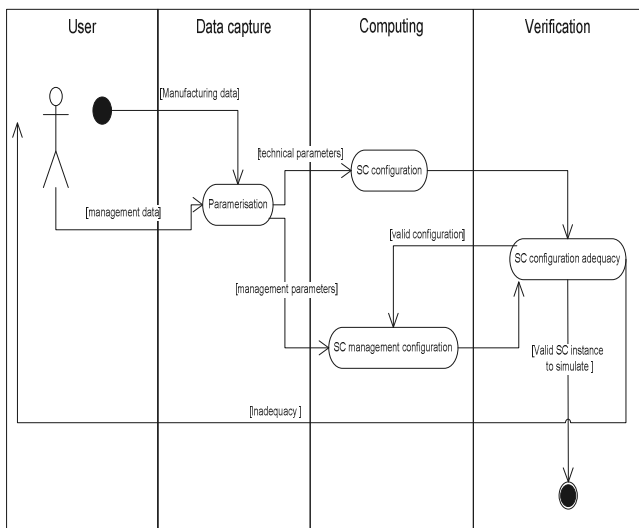


Figure 3 UML activity configuration model

The detailed process is described in Figure 4. The manufacturing data are: product Bill of Material (BOM) and manufacturing type. Management data concern the demand response strategy and the planning policy.

Data concerning manufacturing capability are measured by means of effectiveness level. For instance, overall equipment effectiveness is used to characterize the effectiveness level. For each effectiveness class various instances can be created. At present, instances are randomly chosen among ten enterprise instances for each class. In future work, an appropriate sampling method for instances creating will be developed. As mentioned above, four effectiveness classes are considered:

Class A: average OEE = 85%

Class B: average OEE = 75%

Class C: average OEE= 60%

Class D: average OEE= 45%

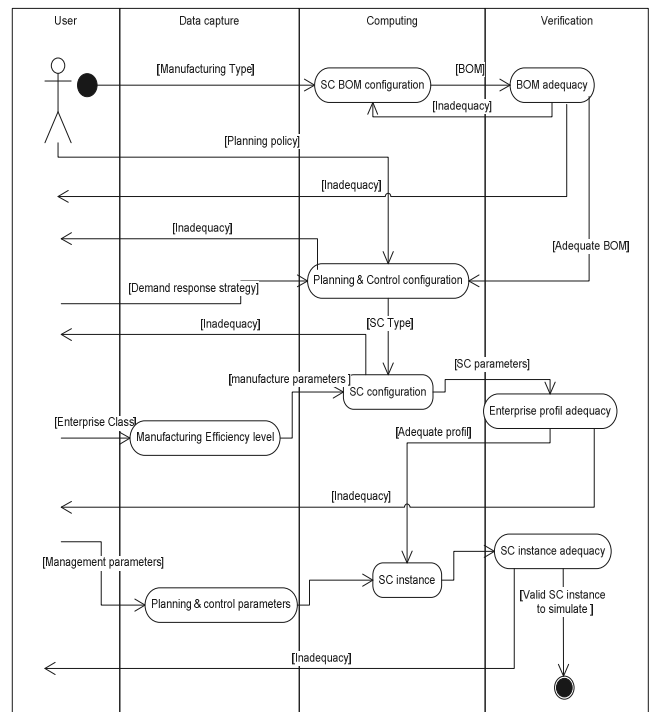


Figure 4 Detailed UML activity configuration model

Once bill of material and management policies are provided, instances of companies' models are created. For each of the four classes (A, B, C and D), an instance is randomly chosen. The variables characterizing the class are: availability, performance, quality, breakdown time percentage of unavailability time, setup percentage of unavailability time, Mean Time Between Failure, relative variability of process time, excess percentage of process time of the non bottleneck process, number of orders per planning time (a day), percentage of excess changeover time (changeover / setup time) and the ratio of handling time to process time (to calculate receipt and delivery unit times).

These data are used to implement simulation parameters. Given a planning time and production rate, several variables are computed for each class instance. These variables constitute the technical characterization of the enterprise instance. Other variables concerning production management are also computed. These include: safety stock, replenishment order point, batch size, percentage of batch that can be launched per order (in the case of components shortage), number of Kanban, Kanban threshold, inventory scrutinizing period, and so on.

**4 SIMULATION EXPERIMENT**

**4.1 Model calibration**

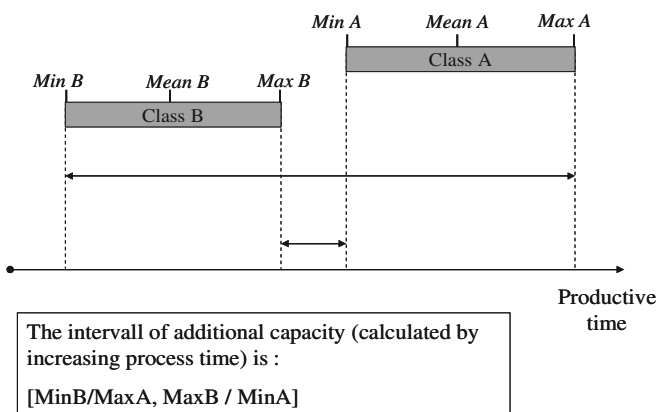
The first experiment is to calibrate the simulation model by taking companies alone. Calibration is done by submitting the same stochastic demand for each enterprise class. Normal distribution of average 50 and standard deviation 5 is used. The demand arrival is every 20 hours. Because of their effectiveness lack, additional capabilities for enterprise class B, C and D are necessary so that they can meet this demand without delay in delivery. The additional capacity is calculated to have the same productive time that the company A, the calculation is made by increasing the process time. Setting the production rate of class A to 0.01 piece per minute, excess capacity varies depending on the enterprise class, the intervals of their values are as follows:

Class B: [1% - 35%]

Class C: [35% - 66%]

Class D: [66% - 100%]

The calculation of these values is done as shown in figure 5.



**Figure 5** Production capacity adjustment

The experiment was conducted using mean values data of each enterprise class with 50 simulation runs for each class.

The ROP parameters were set different for the four classes; by simulation adjustment (calibration of the model to insure zero delivery delay with minimum inventory level). For instance, the reorder point average values are as follows:

Class A: 70

Class B: 80

Class C: 100

Class D: 140

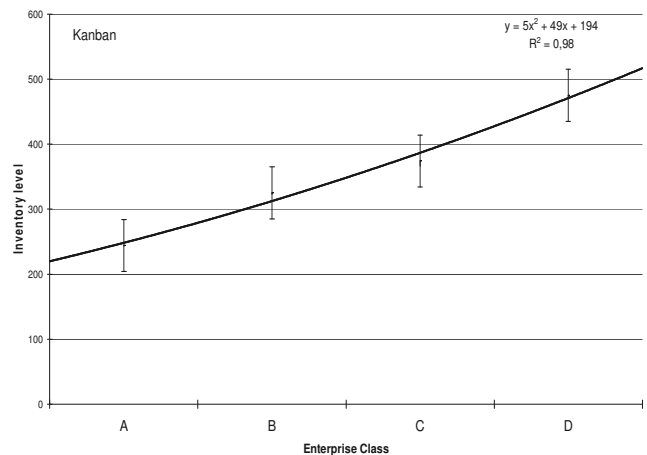
Lot sizes are respectively equal to: 80, 90, 110 and 150.

For Kanban policy, the lot sizes are smaller. They are respectively equal to: 40, 50, 55, 60 for A, B, C and D.

For the same demand, notice the superiority of Kanban system. With this system, with equal excess capacity, lower inventory levels are performed. This is due to smaller lot sizes and safety stocks.

Kanban system can insure more flows leanness without delivery delays. However, this system is less robust regarding uncertainties (breakdowns and scrape) and more difficult to calibrate (especially for less efficient enterprises). So, afterwards, we experiment the ROP system for simulating supply chain configurations (because of the higher robustness of this system and the easiness of its calibration).

Next experiment uses the same calibrated single manufacturers' tiers and incorporates them within a three echelons supply chain. Then, the finale demand is adjusted to permit a sufficient capacity of the resulted supply chain.



**Figure 6-a** Kanban model calibration

Figures 6-a and 6-b illustrates the comparison of inventory levels and excess capacity of the four classes of companies, by using the two management policies ROP and Kanban.

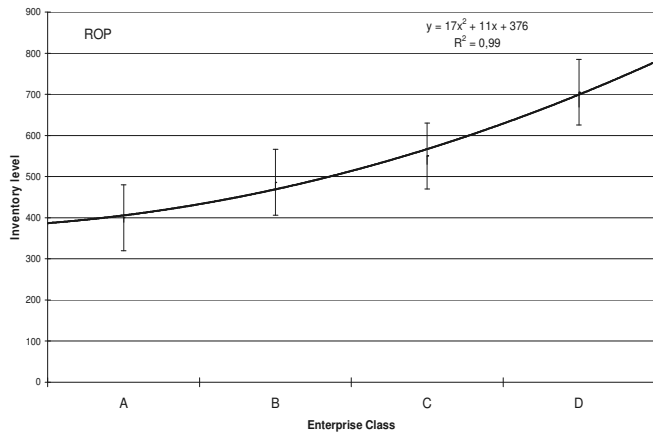


Figure 6-b ROP model calibration

4.2 Supply chain configurations simulation

Once this calibration of models done, the experiment carried out aim to compare configurations of supply chain composed of different classes of effectiveness and implementing ROP management policy in a make to stock environment.

The simulation is made by submitting an external normal stochastic demand with mean of 35 units and standard deviation of 5; to a three tiers serial supply chain. The performance indicators are measured by means of inventory levels and delivery delays. 50 simulation runs was conducted for each scenario with a simulation run length of 10.000 hours.

Figure 7 shows the inventory levels and delivery delays of supply chains formed by similar enterprise types. For instance the configuration AAA, BBB, CCC and DDD

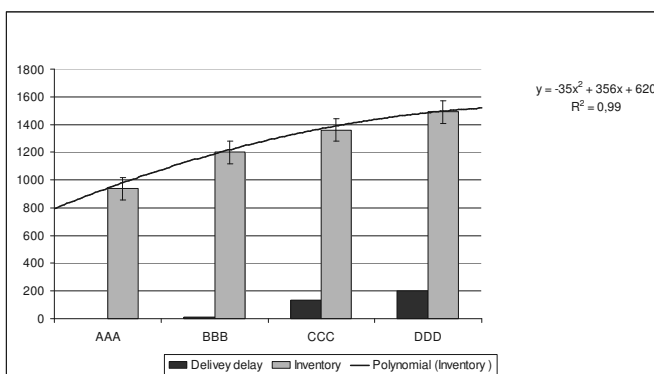


Figure 7 Homogeneous supply chains performance

Inventory level is raising quadratic regarding the supply chain constituent effectiveness. The most effective chain is the one composed of efficient firms. Meanwhile, only

configuration AAA performs without delivery delay. The latter rises linearly when effectiveness level decreases.

The experiment consists also of analyzing supply chains configurations composed of tiers having dissimilar effectiveness levels. Specially chains including firms A and D classes.

Figure 8 demonstrates some of these configurations performance in terms of inventory, delay and extra-capacity (the overall excess capacity of the chain is calculated by adding the capacities ratios of the three tiers).

Most effective configurations are: AAA, BAA, AAB and CAA. Placing a less efficient enterprise in the first tier of a chain composed downstream of enterprises class A don't affect the performance of the chain.

Configurations such DAA and DDA, perform also without delivery delays but with more inventories. Configurations CCC, DDD and AAC perform with delivery delay of about 150 hours and their inventory levels are also significant (50% more than the best case AAA). Configurations including the sequences AD upstream or downstream the chain have high delivery delays; some of them can not met demand at all; (ADD and AAD).

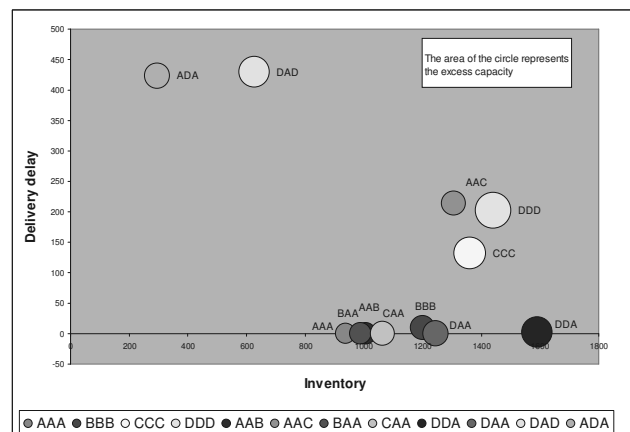


Figure 8 supply chain configurations performance

These observations highlight that the position of the poorest process in a supply chain impacts its performance. Inefficient customer enterprise supplied with more effective firms which produce with smaller lot sizes leads to significant bullwhip effect and damage seriously the overall performance of the chain. Note also that the simulation results are consistent with the principles of lean manufacturing. Indeed, in a production to stock environment, effectiveness of the production process alignment is important. But it is interesting to analyze production to order environments to validate certain aspects related to the concept of agile manufacturing. It is to study the behavior of the supply chain depending on whether the process is upstream or downstream from the demand decoupling point.

These aspects will be discussed in next works. Emphasis will be placed on the coexistence of pull / push systems within the same supply chain, and compare strategies where production bottlenecks operate on stock or to order.

Besides, the variability is even more important than the profiles of the companies are less efficient. So bullwhip effect is not only due to dissimilar lot sizes transferred along the supply chain, but also to the performance of local firms. A more detailed analysis is needed to dissect this effect and determine the portion due to local performance losses.

---

## CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS

---

In this paper, a generic simulation model of the supply chain is developed and implemented under general simulation software, coupled with spreadsheet tool. The model instantiation is used to treat a wide variety of supply chain scenarios. Indeed, the model can be instantiated according to the type of production process, the management policies used and the level of internal effectiveness. The incorporation of different types of process allows implementation of transfer chains, assembly and differentiation strategies. The management styles can be made with ROP or Kanban systems by using a production to stock, to order or assemble to order demand response strategies. As for the level of effectiveness, overall equipment effectiveness is used as effectiveness metric. This allows normalization of data instantiation of the enterprises profiles. Hence, a classifying scheme of manufacturing systems into four main classes of effectiveness is developed. For each class, a variety of instances can be implemented. The simulation tool is fairly generic and can be adapted to most of manufacturing systems.

The simulation tool has been tested in the case of a supply chain producing to stock two types of products. In the first experiment, management parameters were set to calibrate models. This includes calibrating production rate to ensure a production without delivery delay. Potential addition of capacity for smaller classes' effectiveness is done by speeding the production run to reach the same productive time than Class A (the best class).

The company profiles calibrated are then incorporated in several supply chain configurations. Under a replenishment stock policy, simulation results highlight the impact of company effectiveness levels on the supply chain inventory levels and delivery delays. Lean production systems insure more effective supply chains. In particular, the effectiveness of the final tier is important to ensure production on stock without delays in delivery. Simulations on the kanban system are underway.

Future work will focus on production to order and assemble to order as well as the use of coordination mechanisms to improve insufficient performance chains. So, simulating information sharing strategies may allow adequate design of supply chains while companies cooperating don't need

change of their management policies. The aim is to implement a best practices guide to assist in the configuration of supply chains by pertinent choice of partners and policies of managing and coordinating flows in the supply under configuration.

---

## REFERENCES

---

- Al-Zubaidi H and Tyler D (2004). A Simulation Model of Quick Response Replenishment of Seasonal Clothing, *International Journal of Retail & Distribution Management*, Vol. 32, No. 6, pp. 320 – 327
- Anderson EG and Morrice DJ (1999). A simulation model to study the dynamics in a service-oriented supply chain, In *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*.
- Bagchi S, Buckley SJ, Ettl M and Lin GY (1998). Experience using the IBM supply chain simulator. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*
- Banks J (1998). Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. *John Wiley*, New York.
- Banks J and Buckley S (2002). Opportunities for simulation in supply chain management. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*
- Bilczko T, Bugbee L, Fitzhugh J, Gilbert D, Halladin S, Rubert J and Budiman B (2003). Aerospace supply chain dynamics. *International Series in Operations Research and Management Science*.
- Byrne PJ, Heavy C (2004). Simulation, a framework for analysing SME supply chains. *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*. Vol. 2, p. 1167-1175.
- Chan F and Qi HJ (2003). An innovative performance measurement method for supply chain management. *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 8 No. 3, pp. 209-23.
- Chan W and Rossetti R (2003). A Prototype Object-Oriented supply chain simulation framework. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*. p.1612-1620.
- Christopher, M (1998). Logistics and Supply Chain Management, *Pitman*, London.
- Chwif L and Barretto MP (2002). Supply chain analysis: spreadsheet or simulation? *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*.
- Enns ST and Suwanruji P (2006). Evaluating the effects of capacity constraints and demand patterns on supply chain replenishment strategies. *International Journal of Production Research*. Vol.44, pp.4607 - 4629
- Feigin GC, Connors D and Crawford I (1996). Shape Up, Ship Out. *OR/MS Today*, 4, p24-30.
- Fischer M, Jähn H and Teich T (2004). Optimizing the selection of partners in production networks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol.20, p.593-601.
- Fishman GS (2001). Discrete-Event Simulation: Modeling, Programming, and analysis. *Springer-Verlag*.
- Harrel C and Tumay K (1994). Simulation made easy. *Engineering & Management press*.
- Hellström D and Johnsson M (2002). Using discrete-event simulation in supply chain planning. *The 14th Annual conference for Nordic Researchers in Logistics, NOFOMA*
- Hung WY, Kucherenko S, Samsatli J et Shah N (2004). A flexible and generic approach to dynamic modelling of supply chain. *Journal of Operational Research Society*. vol. 55, pp. 801-813.
- Ingalls RG and Kasales C (1999). CSCAT: The Compaq Supply Chain Analysis Tool. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*.
- Johnson HT and Lesshammar M (1999). Evaluation and improvement of manufacturing performance measuring systems

- the role of OEE. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 19 No. 1, pp. 55-78.
- Kim CS, Tannock J, Byrne M, Farr R, Cao B, Er M (2004). State of the art review: techniques to model the supply chain in an extended enterprise. *Operations Management Division University of Nottingham. VIVACE PROJECT*
- Kleijnen J (2005). Supply chain simulation tools and techniques: a survey. *International Journal of Simulation and Process Modelling*. Vol. 1, No.1/2 pp. 82 - 89.
- Kumar A, Ow PS and Prietula MJ (1993). Organizational Simulation and Information Systems Design: An Operations Level Example. *Management Science*, 39(2), pp.218-240
- Labarthe O, Espinasse B, Ferrarini A and Montreuil B (2007). Toward a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in a mass customization context. *Simulation Modelling Practice and Theory* Num15 , pp. 113–136.
- Law AM and Kelton WD (2000). Simulation modelling and analysis, third ed. *McGraw-Hill*, New York.
- Li X and Wang Q (2006). Coordination mechanisms of supply chain systems. *European journal of operational research*. Vol179.pp.1-16.
- Lin CR and Chen HS (2004). A fuzzy strategic alliance selection framework for supply chain partnering under limited evaluation resources. *Computers in Industry*. Vol.55, p.159-179.
- Maloni MJ and Benton WC (1997). Supply Chain Partnerships: Opportunity for Operations Research. *European Journal of Operational Research*, 101: pp.419-429
- Miltenburg J (1995). *Manufacturing Strategy*, Productivity Press Portland, Oregon.
- Nakajima S (1989). *TPM Development Program*, Productivity Press, Cambridge. MA.
- Ng WK, Piplani R and Viswanathan S (2003). Simulation workbench for analysing multi-echelon supply chains. *Integrated manufacturing systems*. Vol 14. pp 449-457.
- Pedersen VB (2001). Supporting partner selection for virtual enterprises. *International Conference on the Design of Information Infrastructure Systems for Manufacturing*. Vol. 191, p.95-102.
- Persson F and Olhager J (2002). Performance Simulation of Supply Chain Designs. *International Journal of Production Economics*, Vol. 77, pp. 231 – 245
- Pundoor M, Herrmann R (2006). A hierarchical approach to supply chain simulation modelling using the Supply Chain Operations Reference model. *International Journal of Simulation and Process Modeling*. Vol.2, p.124-132.
- Reiner G and Trcka M (2004). Customized supply chain design: problems and alternatives for a production company in the food industry. A simulation based analysis. *International Journal of Production Economics*, Vol. 89, pp. 217 – 229
- Robinson S (2004). *Simulation: the practice of model development and use*. Wiley, Chichester, UK.
- Robinson S (2005). Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next? *Journal of the Operational Research Society*. 56, pp. 619–629
- Sahin F and Robinson P-E (2005). Information sharing and coordination in make to order supply chains. *Journal of operations management*. Vol.23.pp.579-598.
- Sarjoughian HS, Wang W, Huang D, Rivera DE, Godding GW, Kempf KG and Mittelmann HD (2005). Hybrid Discrete event simulation with model predictive control for semiconductor supply chain manufacturing. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*
- Smits M, Heuvel V and Huisman W (2006). The Tacit Liaison between Networkability and Supply Chain Performance. *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Vol.08.
- Schriber TJ and Brunner DT (2005). Inside discrete-event simulation software: how it works and why it matters. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*
- Swaminathan JM, Sadeh NM and Smith SF (1995). Information Exchange in Supply Chains. *Technical Report. CMU-RI-TR-95-36. Carnegie Mellon University*, Pittsburgh, PA.
- Swaminathan JM (1998). Modeling supply chain dynamics: A multi-agent approach. *Decision Sciences*. Vol.29
- Tannock J, Cao B, Farr R and Byrne M (2007). Data-driven simulation of the supply-chain-Insights from the aerospace sector. *International Journal of Production Economics*. pp.70–84.
- Terzi S and Cavalieri S (2004). Simulation in the supply chain context: a survey. *Computers in Industry*, Vol. 53, pp.3 – 16.
- Towill DR, Naim NM and Wikner J (1992). Industrial Dynamics Simulation Models in the Design of Supply Chains. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*. vol 22, pp.3-13
- Trkman P, Stemberger MI, Jaklic J and Groznik A (2007). Process approach to supply chain integration. *Supply Chain Management: An International Journal*.vol 12, pp.116–128.
- Turban E, McLean E and Wetherbe J (2004). *Information Technology for Management*, 4th ed., Wiley, New York.
- Umeda S and Lee T (2004). Design specifications of a generic supply chain simulator. *Proceedings of the 2004 Winter simulation conference*.
- Wyland B, Buxton K and Fuqua B (2000). Simulating the Supply Chain, *IEE Solutions*, January, pp. 37 – 42



Contents lists available at ScienceDirect

## Int. J. Production Economics

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ijpe](http://www.elsevier.com/locate/ijpe)

# Optimization methods for a stochastic surgery planning problem

Mehdi Lamiri, Frédéric Grimaud, Xiaolan Xie \*

*Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 158 Cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, France*

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 11 April 2007

Accepted 18 November 2008

Available online 18 January 2009

### Keywords:

Operating room

Surgery planning

Emergency

Stochastic programming

Monte Carlo simulation

Heuristics

## ABSTRACT

The purpose of this paper is to propose and compare several optimization methods for elective surgery planning when operating room (OR) capacity is shared by elective and emergency surgery. The planning problem is considered as a stochastic optimization problem in order to minimize expected overtime costs and patients' related costs. An "almost" exact method combining Monte Carlo simulation and mixed integer programming is presented, and its convergence properties are investigated. Several heuristic and meta-heuristic methods are then proposed. Numerical experimentations are conducted to compare the performance of different optimization methods.

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Many hospitals use the same Operating rooms (ORs) to provide service to two distinct categories of patients: elective and emergency patients. Elective patients usually spend time on a waiting list before being given an appointment for their surgery. Emergency patients arrive randomly and require immediate surgical intervention; they cannot be delayed for more than few hours. These two patients groups have differing service requirements, but share the same set of resources namely the ORs. Therefore, the planning of surgical activities must take into account the uncertain nature of emergency surgery demand; otherwise, it may result in delays of surgeries, postponement of procedures or overtime usage, which can significantly degrade the quality of service, and/or generate additional costs for the hospital.

This paper presents and evaluates several optimization methods for the problem of surgery planning when the ORs' capacity is shared among elective and emergency patients. Elective patients can be planned in advance.

However, emergency patients arrive randomly during the day and must be operated in the first available OR; on the day of arrival.

ORs represent the hospital's greatest revenue source (Denton et al., 2007); they have been estimated to account for more than 40% of the total revenue. Meanwhile, they constitute the largest cost center, and consume a large proportion of total expenses. As a result, they offer the potential for significant cost saving. Therefore, ORs planning and scheduling have been extensively addressed in health care literature. Beliën and Demeulemeester (2007) developed analytical models and solutions heuristics for building cyclic master surgery schedules to minimize the expected total bed shortage. Vissers et al. (2005) studied the problem of master surgery schedule while considering multiple resources; they formulated the problem as a mixed integer program and solved it heuristically. Marcon et al. (2003) proposed a tool to assist the planning negotiation between the different actors of the surgical suite by estimating the risk of non realization of tentative surgery plans. A two-step approach was proposed by Guinet and Chaabane (2003) and Jebali et al. (2006) for the operating theater scheduling problem. First, elective patients are assigned to ORs. Patients assigned to each OR are then scheduled on a daily basis in order to satisfy material and personnel

\* Corresponding author. Tel.: +33 4 7742 66 95; fax: +33 4 7742 02 49.

E-mail addresses: [Lamiri@emse.fr](mailto:Lamiri@emse.fr) (M. Lamiri), [Grimaud@emse.fr](mailto:Grimaud@emse.fr) (F. Grimaud), [Xie@emse.fr](mailto:Xie@emse.fr) (X. Xie).

related constraints. Integer programming models were developed for the patients' assignment problem. Fei et al. (2008) used branch-and-price to solve the elective surgery planning while minimizing ORs' over-utilization and under-utilization. Hans et al. (2008) considered the problem of assigning elective surgeries and planned capacity slack to OR days. The planned slack aims at minimizing the overtime by absorbing the variability of surgeries duration. Various heuristic rules were used to solve this problem. Several other approaches for ORs planning have been proposed in the literature (Magerlein and Martin, 1978; Dexter et al., 1999; Ozkarahan, 2000; Hsu et al., 2003; Ogulata and Erol, 2003; Pham and Klinkert, 2008; Beliën and Demeulemeester, 2008).

Though a variety of approaches for OR planning have been proposed in the literature, only few studies have considered the situation where ORs are used to provide service to elective and emergency patients. Gerchak et al. (1996), propose a stochastic dynamic programming model for the advance scheduling of elective patients for ORs serving elective and emergency patients. The focus of their work is to determine at the start of each day how many additional requests for elective surgery to assign for that day. Though similar to our problem, their model is mono-period and does not specify the intervention date for each elective patient.

By using discrete events simulation, Wullink et al. (2007) compared two approaches to deal with emergency surgery: (i) reserving some dedicated ORs exclusively for emergency surgery and (ii) sharing the available ORs between elective and emergency surgery. The authors came to the conclusion that the second approach lead to better performances: shorter waiting time for emergency patients and better utilization of ORs.

In this paper, we focus on the planning of elective surgery when the ORs' capacity is shared between elective and emergency patients. Elective patients can be planned starting from an earliest date with a patient related cost depending on the date of surgery. A random amount of ORs' capacity is used to serve emergency patients. The planning problem consists of determining a plan that specifies the set of elective patients that would be operated in each period over a planning horizon; with the best trade-off between patients' related costs and ORs' expected overtime costs. The planning problem is formulated as a stochastic integer program, and several optimization methods are proposed and evaluated.

This study is a continuation of our earlier work (Lamiri et al., 2008) in which a stochastic programming model and a Monte Carlo optimization approach were proposed for elective patients planning under uncertain demand for emergency surgery. The Monte Carlo approach relies on mixed integer programming and hence leads to a long computation time for problems with large size.

The new contribution of this paper is two-fold. First, convergence properties of the Monte Carlo optimization method are investigated in depth. We prove that the solution of the Monte Carlo method converges to a real optimum at an exponential rate; and furthermore the convergence rate is maximal since the common random number (CRN) scheme is used. These convergence proper-

ties not only provide a theoretical support of the Monte Carlo approach but also provide guidelines for developing efficient heuristic solution approach for the stochastic combinatorial optimization problem. The convergence properties make it possible to convert the stochastic optimization problem into a deterministic one as in the Monte Carlo approach and then adapt/develop heuristic approaches to solve resulting deterministic problem. Second, several heuristic and meta-heuristic methods are proposed and evaluated comparing with the Monte Carlo optimization method. From numerical experiments, we identify heuristic methods that provide near-optimal solution in a short computation time. Some interesting behaviors concerning problem difficulty with regards to the uncertainty's variability are observed.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 gives a formal problem description and presents a stochastic programming model. Section 3 provides an "almost" exact Monte Carlo optimization method. Convergence properties of this optimization method are investigated in Section 4. Section 5 proposes heuristic and meta-heuristic optimization methods. Section 6 presents experimentation results, and finally Section 7 concludes the paper and gives some directions for future research.

## 2. Problem description

This section presents a stochastic programming model for surgery planning when OR capacity is shared among elective and emergency surgery.

Consider a finite planning horizon of  $H$  periods (days), and a set of  $N$  elective patients waiting to be operated. The planning problem consists of determining the set of elective patients to be operated in each period over the planning horizon. The assignment to specific OR, starting times and sequence of surgical cases can be determined at a later stage on a day-to-day base (Weiss, 1990; Denton and Gupta, 2003; Liu and Liu, 1998; Denton et al., 2007). We assumed that ORs are identically equipped, each patient can be assigned to any OR, and only the total available capacity of all ORs is taken into account. However, the planning model and the optimization methods can be easily extended to plan different types of ORs and to take into account OR assignment of surgical cases.

Let  $T_t$  be the total ORs' available regular capacity in period  $t$  ( $t = 1, \dots, H$ ), i.e., the number of regular working hours. If the duration of planned surgeries and emergency surgery exceeds this regular capacity, then overtime costs are incurred. Let  $c_t$  be the cost per unit of overtime in period  $t$ .

Emergency patients arrive randomly and require immediate surgical interventions. They must to be operated as soon as possible on the day of arrival. In other words, all emergency patients must be operated on the day of arrival whatever the available capacity. Let  $W_t$  be the capacity, i.e. total OR time, needed for emergency cases arriving in period  $t$ . It is assumed to be a random variable. Let  $f_{W_t}(x)$ , be the density function of  $W_t$ .

Elective patients are those that can be safely delayed and planned for future dates, i.e., that can be planned in advance. In this work, each elective patient  $i \in \{1, \dots, N\}$  has the following characteristics: an operating time  $d_i$ , a release period  $r_i$ , and a set of costs  $p_{it}$  ( $t = r_i, \dots, H, H+1$ ).

The operating time includes surgery duration, pre-surgery set-up and post-surgery OR cleaning time. Operating times can be efficiently estimated by using historical information and/or surgeons' and ORs managers' expertise (Shukla et al., 1990; Wright et al., 1996; Combes et al., 2008).

The release period  $r_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) is the earliest period that elective case  $i$  can be performed, it may represent hospitalization date, date of medical test delivery, etc.

The  $p_{it}$  represents the cost of performing elective case  $i$  in period  $t$  ( $t = r_i, \dots, H, H+1$ ). The period  $H+1$  is a "fictitious" period added to the planning horizon for patients that are rejected from the current planning. Rejected patients will not be operated within the planning horizon, but will be considered in the next horizon. So  $p_{i(H+1)}$  is the cost of rejecting the case  $i$  from the current planning. Several constraints can be modeled by using the set of costs  $p_{it}$ . They can represent hospitalization costs (Jebali et al., 2006; Guinet and Chaabane, 2003), penalties for waiting to get on schedule (Gerchak et al., 1996), optimal surgery date, patients' or surgeons' preferences, and eventual deadlines.

The notations defining the problem are summarized in the following.

- $H$  planning horizon,
- $t \in \{1, \dots, H\}$  time period index,
- $T_t$  total available regular capacity of all ORs in period  $t$ ,
- $c_t$  cost per unit of overtime in period  $t$ ,
- $N$  number of elective cases,
- $i \in \{1, \dots, N\}$  elective case index,
- $d_i$  time needed for performing elective case  $i$ ,
- $r_i$  earliest period for performing elective case  $i$ ,
- $p_{it}$  cost of performing elective case  $i$  in period  $t$ ,
- $W_t$  random variable representing the total capacity used by emergency surgery in period  $t$ .

The overall objective is to assign elective patients to different periods in order to minimize the sum of elective patients' assignment costs and *expected* overtime costs.

Let  $X_{it} \in \{0, 1\}$  be the decision variables, with  $X_{it} = 1$  if elective case  $i$  is performed in period  $t$  ( $t \in \{r_i, \dots, H+1\}$ ) and 0 otherwise.  $X_{i,H+1} = 1$  means that elective case  $i$  is assigned to the "fictitious" period  $H+1$  or equivalently rejected from the current planning horizon. Let  $I_t$  be the set of patients assignable to period  $t$ , i.e.,  $I_t = \{i \in \{1, \dots, N\} \text{ such that } r_i \leq t\}$ .

The elective surgery planning problem is then formulated as follows:

$$(P) \quad J^* = \text{Minimize } J(X) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=r_i}^{H+1} p_{it} X_{it} + \sum_{t=1}^H c_t E_{W_t} \left[ \left( W_t + \sum_{i \in I_t} d_i X_{it} - T_t \right)^+ \right] \quad (1)$$

Subject to :

$$\sum_{t=r_i}^{H+1} X_{it} = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (2)$$

$$X_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, \quad t \in \{r_i, \dots, H+1\} \quad (3)$$

where  $E_{W_t}[\cdot]$  is the mathematical expectation with respect to the probability distribution of  $W_t$ , and  $(y)^+ = \max\{0, y\}$ .

The criterion (1) to be minimized is composed of elective patients' related costs and ORs overtime costs. Constraints (2) ensure that each elective case is assigned exactly once. Constraints (3) are the integrity constraints.

For a given solution  $X$ , the cost  $J(X)$ , i.e., the objective function value, can be computed either

- *analytically*, through numerical integration:

$$J(X) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=r_i}^{H+1} p_{it} X_{it} + \sum_{t=1}^H c_t \int_{m_t}^{\infty} (z - m_t) f_{W_t}(z) dz \quad (4)$$

where  $m_t = T_t - \sum_{i \in I_t} d_i X_{it}$  is the remaining regular capacity in period  $t$ .

- or by Monte Carlo *simulation*:

$$J(X) \approx J_L(X) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=r_i}^{H+1} p_{it} X_{it} + \sum_{t=1}^H c_t \frac{1}{L} \sum_{k=1}^K \left( W_t^k + \sum_{i \in I_t} d_i X_{it} - T_t \right)^+ \quad (5)$$

where  $W_t^1, \dots, W_t^L$  are  $L$  independent random samples generated for random variable  $W_t$ ,  $t \in \{1, \dots, H\}$ .

The elective surgery planning model (1)–(3) is a stochastic combinatorial problem. In a previous work (Lamiri et al., 2008), we proved that the planning problem is strongly NP-hard and its NP-hardness remains true even for the two-period planning problem ( $H = 2$ ).

### 3. "Exact" Monte Carlo optimization method

In this section we present an almost exact method to solve the elective cases planning problem ( $P$ ), referred to as the *true* optimization problem, by using Monte Carlo simulation and mixed integer programming.

The basic idea of this method is the use of Monte Carlo simulation to estimate the mathematical expectations, in the criterion (1), by their sample averages. Based on this estimation, the stochastic planning problem can be approximated by a deterministic optimization problem. This method is also known as the sample path method or the stochastic counterpart method (Ruszczynski and Shapiro, 2003).

More specifically,  $K$  independent random samples  $W_t^1, \dots, W_t^K$  are generated for each random variable  $W_t$ ,  $t \in \{1, \dots, H\}$ , and the mathematical expectations in the objective function (1) are approximated by their sample averages (empirical means). Consequently, the *true* problem ( $P$ ) can be approximated by a *sample average*

approximation (SAA) problem ( $P_K$ ):

$$(P_K) \quad J_K^* = \text{Minimize } J_K(X) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=r_i}^{H+1} p_{it} X_{it} + \sum_{t=1}^H c_t \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left( W_t^k + \sum_{i \in I_t} d_i X_{it} - T_t \right)^+ \quad (6)$$

Subject to (2) and (3).

The sample average approximation problem ( $P_K$ ) can be formulated as the following mixed integer program:

$$(P_K) \quad J_K^* = \text{Minimize } J_K(X) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=r_i}^{H+1} p_{it} X_{it} + \sum_{t=1}^H c_t \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K O_{tk} \quad (7)$$

Subject to:

$$O_{tk} \geq W_t^k + \sum_{i \in I_t} d_i X_{it} - T_t, \quad \forall t \in \{1, \dots, H\}, \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (8)$$

$$\sum_{t=r_i}^{H+1} X_{it} = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \quad (9)$$

$$O_{tk} \geq 0, \quad \forall t \in \{1, \dots, H\}, \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (10)$$

$$X_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, \quad t \in \{r_i, \dots, H+1\} \quad (11)$$

This problem can be solved by using one of the classical deterministic optimization methods. The objective function (7) minimizes the sum of patient related costs and the approximated overtime costs. Constraints (8) define the overtime  $O_{tk}$  related to each sample or scenario  $W_t^k$  in each period. Constraints (9) ensure that each elective case is assigned exactly once. Constraints (10) and (11) are variables' type related constraints.

The planning optimization can be carried out with the following algorithm:

*Step 1.* For each time period  $t$ , generate  $K$  independent random samples  $W_t^1, \dots, W_t^K$  of  $W_t$ .

*Step 2.* Solve the corresponding approximation problem ( $P_K$ ) and let  $X_K^*$  be the resulting optimal solution.

*Step 3.* Evaluate the true objective function value  $J(X_K^*)$ , using one of the methods presented in the previous section (analytically or by simulation).

**Remark.** If  $J(X_K^*)$  is evaluated at Step 3 by using simulation, i.e.,  $J(X_K^*) := J_L(X_K^*)$ , then the  $L$  samples used to evaluate  $J_L(X_K^*)$  are generated independently of the samples used when solving the SAA problem ( $P_K$ ), and  $L$  is typically much bigger than  $K$ .

The optimal value  $J_K^* = J_K(X_K^*)$  and the optimal solution  $X_K^*$  of the problem ( $P_K$ ) are considered as estimators of their counterparts of the true problem.

#### 4. Convergence properties of Monte Carlo optimization

In this section, we are interested in the convergence properties of the solution provided by the Monte Carlo optimization method. The SAA problem ( $P_K$ ) is an

approximate of the true problem ( $P$ ) where the exact criterion  $J(X)$  is replaced by an estimated criterion  $J_K(X)$ . Let denote by  $S$  the set of all feasible solutions  $X$  of the true problem ( $P$ ) and by  $S^*$  the set of optimal solutions. The SAA problem aims to find the solution  $X_K^*$  that minimizes the estimated criterion, i.e.,

$$X_K^* = \arg \min_{X \in S} J_K(X)$$

The optimal solution  $X_K^*$  of the SAA problem represents an estimate of the true optimal solution (the optimal solution of the true problem); it is called the *estimated* optimal solution.

We note that the estimated criterion is evaluated using the same set of samples  $W_t^k$ , ( $t = 1, \dots, H$ ,  $k = 1, \dots, K$ ), i.e., the same stream of random numbers. This strategy is widely known as the scheme of CRNs a well-known variance reduction technique (Law and Kelton, 1991).

In a previous work (Lamiri et al., 2008), we proved that the optimal solution  $X_K^*$  of the SAA problem ( $P_K$ ) converges with probability one to a true optimal solution of problem ( $P$ ) as  $K$  goes to infinity. In this subsection, convergence properties are investigated in more depth and several interesting results are highlighted.

The estimated criterion  $J_K(X)$  converges to the exact criterion  $J(X)$  as the number of samples goes to infinity. The convergence of the estimated criterion is slow at the rate of at most  $O(1/\sqrt{K})$  according to the law of large numbers, i.e., a large number of samples is needed to obtain an accurate estimation of the criterion. So, intuitively, it is expected that a very large number of samples with the SAA problem is needed in order to find the optimal solution of the true problem.

However, in this section, we prove that the estimated optimal solution  $X_K^*$  converges to a true optimal solution faster than the criterion itself do; it converges exponentially fast. In other words, a modest number of samples is sufficient to find the optimal solution, or at least a good solution, of the true problem.

More specifically, we prove that the probability  $P(X_K^* \in S^*)$  of finding a true optimal solution converges to 1 exponentially fast as  $K$  increases, i.e., there exist positive constants  $\gamma > 0$ ,  $\eta > 0$  such that  $P(X_K^* \in S^*) \geq 1 - \gamma e^{-\eta K}$ . Further more, we prove that the rate of convergence  $\eta$  is maximized by using the CRN scheme.

The exact criterion  $J(X)$  can be restated as follows:

$$J(X) = E[G(X, W)] \quad (12)$$

where

$$G(X, W) = \sum_{it} p_{it} X_{it} + \sum_t c_t \left( W_t + \sum_i X_{it} d_i - T_t \right)^+$$

and  $W = [W_1, \dots, W_H]$  is an array of random variables. Obviously,  $G(X, W)$  is a random variable.

Arrays  $W_k = [W_1^k, \dots, W_H^k]$ ,  $k \in \{1, \dots, K\}$ , represent a sequence of i.i.d (independent identically distributed) random samples of the random array  $W$ , and  $G(X, W^k)$  are i.i.d random samples of  $G(X, W)$ . So the estimated

criterion can be written as

$$J_K(X) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[ \sum_{i,t} a_{it} x_{it} + \sum_t c_t \left( W_t^k + \sum_i x_{it} d_i - T_t \right)^+ \right] = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K G(X, W^k) \tag{13}$$

Note that, for any given  $X$ ,  $\{G(X^u, W^k) - G(X^v, W^k), k \geq 1\}$  is a sequence of i.i.d random variables, and  $E[G(X, W^k)] = E[J_K(X)] = J(X)$ .

Suppose that the stochastic problem (P) has  $m$  feasible solutions, i.e.,  $S = \{X^1, X^2, \dots, X^m\}$ . Without loss of generality, we assume that the  $m$  solutions are indexed in such a way that  $J(X^1) = J(X^2) = \dots = J(X^n) < J(X^{n+1}) \leq \dots \leq J(X^m)$ , i.e., there are  $n$  optimal solutions  $S^* = \{X^1, X^2, \dots, X^n\}$ .

For any  $(u, v) \in (\{1, \dots, n\}, \{n+1, \dots, m\})$ ,  $\{G(X^u, W^k) - G(X^v, W^k), k \geq 1\}$  is a sequence of i.i.d random variables.

Let us define, for any

$$(u, v) \in (\{1, \dots, n\}, \{n+1, \dots, m\}),$$

$$M_{uv}(\lambda) = \exp[\lambda(G(X^u, W^1) - G(X^v, W^1))]$$

$A_{uv}(\lambda) = \log M_{uv}(\lambda)$  and  $A_{uv}^*(x) = \sup_{\lambda \geq 0} \{\lambda x - A_{uv}(\lambda)\}$ , where  $M_{uv}(\lambda)$  is the moment generating function and  $A_{uv}^*(x)$  the Fenchel–Legendre transform of  $A_{uv}(\lambda)$ .

**Assumption (A).** For any  $(u, v) \in (\{1, \dots, n\}, \{n+1, \dots, m\})$ , the moment generation function  $M_{uv}(\lambda)$  exists in a neighborhood  $(-\varepsilon, \varepsilon)$  of  $\lambda = 0$  for some  $\varepsilon > 0$ .

**Lemma 1.** Under Assumption (A), if  $X^u$  and  $X^v$  are two solutions with  $J(X^u) < J(X^v)$ , then

$$P[J_K(X^u) > J_K(X^v)] \leq \exp(-KA_{uv}^*)$$

where  $A_{uv}^* = A_{uv}^*(0) = \sup_{\lambda \geq 0} \{-\log M_{uv}(\lambda)\}$ .

**Proof.** Using Eq. (13), we have

$$P[J_K(X^u) > J_K(X^v)] = P\left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (G(X^u, W^k) - G(X^v, W^k)) > 0\right] \tag{14}$$

Since  $\{G(X^u, W^k) - G(X^v, W^k), k \geq 1\}$  is a sequence of i.i.d random variables with  $E[G(X^u, W^1) - G(X^v, W^1)] = J(X^u) - J(X^v) < 0$ , from (Xie, 1997; Lemma 4.3), (Lemma provided in the Appendix), we have

$$P\left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (G(X^u, W^k) - G(X^v, W^k)) > 0\right] \leq \exp(-KA_{uv}^*(0))$$

which completes the proof.  $\square$

Lemma 1 means that the probability of the event “the estimated cost of a non optimal solution  $X^v$  ( $v \in \{n+1, \dots, m\}$ ) is less than the estimated cost of an optimal solution  $X^u$  ( $u \in \{1, \dots, n\}$ )” converges to zero exponentially fast with a rate equal to  $A_{uv}^*$ .

**Theorem 1.** Under Assumption (A), there exist positive constants  $\gamma > 0, \eta > 0$  such that

$$P(X_K^* \in S^*) \geq 1 - \gamma e^{-\eta K}$$

**Proof.**

$$P(X_K^* \notin S^*) = P\left[\min_{u=1..n} J_K(X^u) > \min_{v=n+1..m} J_K(X^v)\right] \leq \sum_{v=n+1}^m P\left[\min_{u=1..n} J_K(X^u) > J_K(X^v)\right] \leq \sum_{v=n+1}^m \prod_{u=1}^n P[J_K(X^u) > J_K(X^v)]$$

Then, from Lemma 1 it follows that

$$P(X_K^* \notin S^*) \leq \sum_{v=n+1}^m \prod_{u=1}^n \exp(-KA_{uv}^*) = \sum_{v=n+1}^m \exp\left(-K \sum_{u=1}^n A_{uv}^*\right) \leq (m-n) \exp\left(-K \min_{v=n+1..m} \left(\sum_{u=1}^n A_{uv}^*\right)\right)$$

Let us define

$$\eta = \min_{v=n+1..m} \left(\sum_{i=1}^n A_{iv}^*\right) \tag{15}$$

Consequently,

$$P(X_K^* \in S^*) = 1 - P(X_K^* \notin S^*) \geq 1 - \gamma \exp(-K\eta) \tag{16}$$

where  $\gamma = m - n > 0$ . We need now to show that  $\eta > 0$ .

For any  $(u, v) \in (\{1, \dots, n\}, \{n+1, \dots, m\})$ ,  $A_{uv}(\lambda)$  exists in  $(-\varepsilon, \varepsilon)$ . From (Dembo and Zeitouni, 1993, Lemma 2.2.5; see Appendix),  $A_{uv}(\lambda)$  is convex and differentiable in  $(-\varepsilon, \varepsilon)$  with  $A_{uv}(0) = 0$ , and the derivative  $A'_{uv}(0) = E[G(X^u, W^1) - G(X^v, W^1)] < 0$ .

Then, for any  $(u, v) \in (\{1, \dots, n\}, \{n+1, \dots, m\})$ ,

$$A_{uv}^* = \sup_{\lambda \geq 0} \{-A_{uv}(\lambda)\} > 0$$

implying  $\eta = \min_{v=n+1..m} (\sum_{i=1}^n A_{iv}^*) > 0$ .  $\square$

In other words, the probability of the event that the optimal solution of the SAA problem provides an optimal solution of the true problem approaches one exponentially fast. Moreover, as stated by the following theorem, convergence rate  $\eta$  is maximized as the optimization method uses the same stream of random numbers to evaluate all the solutions.

**Theorem 2.** Under Assumption (A), the convergence rate  $\eta$  of  $P(X_K^* \in S^*)$  is maximized by using the CRN scheme.

**Proof.** Recall that the convergence rate is

$$\eta = \min_{v=n+1..m} \left(\sum_{i=1}^n A_{iv}^*\right)$$

First, we will prove that, for any  $(u, v) \in (\{1, \dots, n\}, \{n+1, \dots, m\})$ , the quantities  $A_{uv}^*$  are maximized by using the CRN scheme. From the definition of  $A_{uv}^*(x)$ , we have

$$A_{uv}^* = \sup_{\lambda \geq 0} \{-A_{uv}(\lambda)\} \tag{17}$$

with

$$A_{uv}(\lambda) = \log M_{uv}(\lambda) = \log E[\exp(\lambda(G(X^u, W^1) - G(X^v, W^1)))]$$

Therefore maximizing  $A_{uv}^*$  is equivalent to minimizing  $A_{uv}(\lambda)$ , and consequently minimizing

$$E[\exp(\lambda(G(X^u, W^1) - G(X^v, W^1)))]$$

Let us define function  $g(\dots)$  as follows:

$$g(a, b) = -\exp(\gamma(a - b)).$$

Hence

$$E[\exp(\lambda(G(X^u, W^1) - G(X^v, W^1)))] \\ = -E[g(G(X^u, W^1), G(X^v, W^1))].$$

It can be easily proved that  $g(\dots)$  is a superadditive function. Therefore, using (Dai and Chen, 1997; Theorem 2.1), provided in the Appendix, sampling  $G(X^u, W^1)$  and  $G(X^v, W^1)$  using the CRN scheme maximizes

$$E[g(G(X^u, W^1), G(X^v, W^1))],$$

and consequently minimizes

$$E[\exp(\lambda(G(X^u, W^1) - G(X^v, W^1)))]$$

Combining the previous result with Eqs. (17), yields that the CRN scheme maximizes  $A_{uv}^*$  for any  $(u, v) \in (\{1, \dots, n\}, \{n + 1, \dots, m\})$ . Using the equality (15), it follows immediately that the CRN scheme maximizes the convergence rate  $\eta$ .  $\square$

To sum up, the estimated solution obtained by solving the SAA problem converges exponentially fast, and with a maximal rate, to a true optimal solution. These results suggest that the Monte Carlo optimization method can efficiently find an *almost* optimal solution of the true problem ( $P$ ) by solving the SAA problem with a modest sample size  $K$  (i.e. by using a small number of samples).

### 5. Heuristic and meta-heuristic methods

The planning problem of elective cases is strongly NP-hard; and the Monte Carlo optimization method relies on a mixed integer program. Hence exact solutions cannot be found in a reasonable amount of time for problems of large size. Therefore, heuristic methods seem to be an interesting choice to be investigated.

#### 5.1. Constructive heuristics

In this subsection, several heuristics for solving the planning problem are presented. These heuristics are based on a sequential optimization method.

*Sequential optimization method:* It is a myopic method, which considers cases one by one. At each step a new case is considered and the algorithm determines the best period to plan it, taking into account the cases already planned. Once the best period is found, the case is assigned to it. At the next step, a new case is considered and so on. The heuristic stops when all the cases are examined.

The best period to plan an elective case, taking into account the cases already planned, is determined in the following way. Without loss of generality, let consider a sequence of  $i$  elective cases  $(1, \dots, i-1, i)$ , and assume that the first  $(i-1)$  cases are already planned. Let  $X =$

$\{(1, t_1), (2, t_2), \dots, (i-1, t_{i-1})\}$  be the plan of these  $(i-1)$  cases, where  $t_k$  is the planned period (the intervention date) of the case  $k$  ( $k \in \{1, \dots, i-1\}$ ), and  $J(X)$  the cost of this plan. Assigning the case  $i$  to a given period  $t$ , without modifying the intervention dates of the first  $(i-1)$  cases, leads to a new plan  $X \cup \{(i, t)\}$ . The best period  $t_i$  to plan the elective case  $i$  is defined as the period that minimizes the cost of the new plan, i.e.:

$$t_i = \arg \min_{r_i \leq t \leq H+1} J(X \cup \{(i, t)\})$$

*Sequential optimization based heuristics:* The solution provided by the sequential optimization algorithm depends on the order in which elective cases are considered. Sequential optimization based heuristics first determine the order and then apply the sequential optimization algorithm. They differ by the case order.

The first three heuristics are longest operating time first (*LOF*), shortest operating time first (*SOF*), and random selection (*RS*). These heuristics correspond to sorting the cases according respectively to a decreasing, increasing and random order of their operating times.

The fourth heuristic is workload based heuristic (*WB1*), and cases are sorted as follows. First, cases are grouped into classes according to their earliest periods  $r_i$ . Cases with the same earliest period form a class. Let  $C_j$  ( $j = 1, \dots, H$ ) the class associated with period  $j$ , i.e.  $C_j = \{i \in \{1, \dots, N\} \text{ such that } r_i = j\}$ , and  $DC_j$  the sum of operating times of all cases inside  $C_j$ , i.e.  $DC_j = \sum_{i \in C_j} d_i$ . Then, cases are sorted according to a decreasing order of  $DC_j$ , and inside a class cases are sorting to a decreasing order of their operating times.

In a similar way another heuristic (*WB2*) is proposed. The only difference with *WB1* is that inside a class cases are sorted to an increasing order of their operating times.

Sequential optimization based heuristics, presented above, have some similarities with dispatching rules developed in the scheduling literature, e.g. shortest processing time first, and longest processing time first, etc... However, to avoid confusing we do not use the scheduling terminology.

#### 5.2. Improvement heuristics

The heuristics, presented in this subsection, start from an initial plan (determined by a constructive heuristic or generated randomly) and try to iteratively improve the solution.

*Sequential improvement (SI) heuristic:* The *SI* heuristic starts from a given plan and tries to improve it iteratively by modifying the cases' intervention dates. At each iteration all elective cases are sequentially examined one after one. For each elective case, the heuristic determines the best period to plan it, taking into account the other  $(N-1)$  planned cases. If the best period is different from the current planned period, then the case's intervention date is modified. The next step considers the next case and so on. The heuristic stops when there is no modification for all cases.

*Local optimization (LO) heuristic:* The *LO* heuristic is based on the local search principle with steepest descent

strategy. The solution is iteratively improved by reassigning elective patients. At each iteration, we compute for each elective patient  $i$  the largest improvement that can be achieved by re-assigning it to another period  $H+1$ , while keeping all others patients' assignments unchanged. Clearly, the re-assignment must satisfy the patient's earliest period. Then we choose among all patients the one that leads to the largest improvement, and we re-assign it. The iterations continue until the solution cannot be improved any more.

*Pair-wise switching (PS) heuristic:* The *PS* heuristic improves the solution iteratively by exchanging the assignment of a couple of elective patients. At each iteration, patients are considered one by one. At each step, we consider a patient  $i$ , we determine patient  $j$  that leads to the largest improvement if the assignments of patients  $i$  and  $j$  are exchanged, without modifying the assignment of all other patients, and while satisfying patients' earliest periods. Then, we exchange the assignments of patients  $i$  and  $j$ . The next step considers another patient and so on. At the next iteration, patients are again considered one by one. The process stops when the solution cannot be improved any more.

*Multi-start (MS) method:* As an attempt to overcome the problem of getting stuck in a local optimum, we use a *MS* method to solve the planning problem. The method builds on the idea of restarting the local optimization heuristic several times with different initial solutions and memorizing the best result. Let  $X$  be the initial solution at a given iteration, and  $Y$  the solution provided by the local search heuristic starting from  $X$ . At the next iteration, a new initial solution  $X'$  is derived from  $Y$  (the solution provided by the local search heuristic in the previous iteration) by randomly selecting some elective cases and modifying their intervention dates. Each elective case  $i$  is selected with probability  $\beta$ . If case  $i$  is selected, then assign it to a randomly generated period  $t$  ( $r_i \leq t \leq H + 1$ ).

Improvement heuristics presented in this subsection are based on local search optimization. They differ by the definition of the neighborhood structure and/or the number of initial solutions exploited. For a comprehensive review of local search optimization, the reader is referred to (Hoos and Stützle, 2005).

### 5.3. Meta-heuristics

*Simulated annealing (SA) heuristic:* The *SA* method is an iterative random local search process (Kirkpatrick et al., 1983; Aarts and Korst, 1989). At each iteration, a new solution is obtained by a random move in the neighborhood of the current solution  $X$  by reassigning a case to a different intervention date. If the new solution  $X'$  is better, i.e.  $J(X') \leq J(X)$ , then the move is accepted and the algorithm continues with  $X'$ . Otherwise, the degrading solution  $X'$  is accepted as the current solution with the probability  $\exp((J(X) - J(X'))/T)$ , where  $T$  is the so-called temperature. The algorithm continues till convergence by appropriately reducing the temperature.

Initially, the temperature  $T$  is set high and gradually decreased through multiplication by a cooling factor  $\alpha$ .

The best-so-far solution is memorized. The starting temperature is determined as follows: estimate  $\Delta J_{\max}$  the maximal deterioration of the objective function value in one move, the starting temperature is set that  $\exp(\Delta J_{\max}/T) \geq 0.9$ . The final temperature is set such that moves which deteriorate the solution by more than 10 are accepted with a probability smaller than 0.001.

*Taboo search (TS) heuristic:* The *TS* method is a local search heuristic with an intelligent exploration of the solution space without being trapped in local optima (Glover et al., 1993). At each iteration, a best valid move is selected and performed. A move is said valid if it is not taboo or if an aspiration criterion is fulfilled. The performed move is recorded in a taboo list and is considered as taboo for the next  $S$  iterations.  $S$  is known as the size of the taboo list. Note that deteriorating moves can be performed when no improving moves exist or all such moves are taboo.

A move is the operation of modifying the intervention date  $t_i$  of an elective case  $i$ . Case  $i$  and period  $t_i$  are the attributes of this move, and are used to create the taboo list. So, after modifying the intervention date of case  $i$ , any move that assigns case  $i$  to period  $t_i$  is considered as taboo and this is implemented by memorizing these attributes in the taboo list. The aspiration criterion used in this heuristic overrides the taboo status of a move if it leads to a new best solution. The heuristic stops when a given number of iterations is reached. The best move within a solution  $X$  is determined in the same way as in Section 5.2 (local optimization heuristic).

## 6. Computational experiments

This section presents numerical results of the "exact" and heuristic optimization methods. All solution methods have been implemented in MS Visual C# .NET 2003, and the sample average approximation problem ( $P_k$ ) is solved using the optimization library ILOG Cplex 11.0. The numerical experiments are carried out on a 3.0 GHz Pentium(R) D with the memory of 1 Gb, and running Windows XP.

Three classes of problems are considered in these experiments. For the first class, the capacity  $W_t$  used by emergency surgery in each period is a random variable exponentially distributed. For the second class  $W_t$  is normally distributed, and finally in the third class  $W_t$  is a deterministic quantity.

All the solution methods presented in this section evaluate solutions (plans) using the analytical method (Eq. (4), Section 2). i.e., the expected overtime is evaluated as:

$$E \left[ \left( W_t + \sum_{i \in I_t} d_i X_{it} - T_t \right)^+ \right] = \int_{m_t}^{\infty} (z - m_t) f_{W_t}(z) dz \quad (18)$$

where  $m_t = T_t - \sum_{i \in I_t} d_i X_{it}$

When  $W_t$  is exponentially distributed an explicit expression for (12) can be derived, without numerical integration. For the case where  $W_t$  is normally distributed, (12) can be expressed by Kleywegt et al. (2002):

$$\bar{m}_t \Phi \left( \frac{\bar{m}_t}{\sqrt{v_t}} \right) + \sqrt{\frac{v_t}{2\pi}} \exp \left( -\frac{\bar{m}_t^2}{2v_t} \right)$$

where  $\bar{m}_t = E[W_t] - m_t$ ,  $v_t = Var(W_t)$ , and  $\Phi(\cdot)$  is the cumulative distribution function of a standard normal random variable.

If  $W_t$  is a deterministic quantity, then (12) is trivially equal to  $(W_t + \sum_{i \in I_t} d_i X_{it} - T_t)^+$ . In this case, the planning problem (P) is a deterministic problem and is equivalent to the SAA problem ( $P_K$ ) with  $K = 1$  and  $W_t^1 = W_t$  ( $t = 1, \dots, H$ ).

### 6.1. Test data

The different solution methods were experimented with problem instances generated randomly according to the following scheme.

The number of periods  $H$  is set equal to 5 (one week). The aggregated ORs' regular capacity  $T_t$  in a period  $t$  depends on the number of ORs available (i.e. the problem size) and the regular capacity of each OR in period  $t$ . In this experimental study we assume that an OR regular capacity always is 8 h, and the number of available ORs is the same in all periods over the planning horizon. The aggregated regular capacity is then  $T_t = \text{number of available ORs} \times 8$  hours. Then, for a problem with 8 ORs, for example, the ORs' regular capacity will be 64 h. Problems with 4, 8 and 12 ORs are considered for the numerical tests. Recall that elective patients are not assigned to specific OR, they are assigned to periods. The number of ORs is used just as a parameter to control the size of problems.

The overtime cost is 500 €/hour. The average daily capacity  $E[W_t]$  needed for emergency cases depends on the number of available ORs;  $E[W_t] = \text{number of available ORs} \times 1.2$  h. The distribution of  $W_t$  ( $t = 1, \dots, H$ ) is set as follows, according to which problem class the instance belongs. For the first class,  $W_t$  is assumed to be exponentially distributed with mean of  $E[W_t]$  hours ( $W_t \sim \text{Exp}(\#ORs \times 1.2 \text{ h})$ ). For the second class,  $W_t$  is normally distributed with a mean  $E[W_t]$  and a standard deviation of  $0.5 \times E[W_t]$ . And for the third class,  $W_t$  is a deterministic value equal to  $E[W_t]$  hours. As an example, for problems with 4 ORs,  $W_t \sim \text{Exp}(4.8)$  for instances belonging to the first class,  $W_t \sim N(4.8, 2.4)$  for instances of second class, and  $W_t$  is a deterministic quantity equal to 4.8 h for instances of the third class.

Durations of elective surgery  $d_i$  are randomly and uniformly generated from the interval [0.5, 3 h].

Release periods  $r_i$  are randomly generated from the set  $\{1, \dots, H\}$  as follows. In order to take into account cases with  $r_i = 1$  that were postponed from the previous planning process, a new variable  $r'_i$  the effective earliest period is introduced for each elective case  $i$ ,  $r'_i$  can take negative value. Earliest dates  $r_i$  are generated in two steps: First, for each case  $i$  we generate an effective earliest period  $r'_i$ . The  $r'_i$  are integer numbers randomly and uniformly generated from the set  $\{-2, \dots, 5\}$ . Then, cases with zero or negative  $r'_i$  will have  $r_i$  equal to one, while the others will have  $r_i$  equal to  $r'_i$  ( $r_i = 1$  if  $r'_i < 1$ ;  $r_i = r'_i$  otherwise).

The costs  $p_{it}$  are assumed to be increasing in  $t$  for each case  $i$ ; they are determined as follows:

$$p_{it} = (t - r'_i) \times c \quad \text{for } t = r_i, \dots, H, \quad \text{and} \\ p_{iH+1} = ((H + 1 - r'_i) \times c) + 2 \times c.$$

The constant  $c$  may represent a penalty per day of waiting to get on schedule, or a hospitalization cost per day if patient  $i$  was hospitalized in period  $r'_i$ . The quantity  $2 \times c$  within  $p_{iH+1}$  represents the penalty of rejecting the case from the current planning. The value of  $c$  is set equal to 150€.

The number of elective cases is determined such that the workload of ORs due to elective cases is  $\tau\%$  of the regular capacity of the entire planning horizon. In these experiments we consider problems with  $\tau$  equal to 85% and 100%. With  $E[W_t] = \#ORs \times 1.2$  h and  $T_t = \#ORs \times 8$  h, the workload of ORs due to emergency surgeries is 15% of the regular capacity of the entire planning horizon. So when  $\tau = 85\%$ , elective cases and emergency surgeries sum up to an average of 100% regular capacity of the ORs, and when  $\tau = 100\%$  elective and emergency surgeries sum up to 115% of ORs' regular capacity. If it is not explicitly mentioned  $\tau$  is supposed to be equal to 85%.

### 6.2. Numerical results

In this subsection we compare exact and heuristic methods on testing problems generated according to the scheme presented in the previous section.

The "exact" optimization method (Monte Carlo simulation and Mixed Integer Programming, MC-MIP) is used with a number of samples  $K$  equal to  $10^3$ . In a previous work (Lamiri et al., 2008) we showed that, with  $K = 10^3$ , MC-MIP method provides an almost optimal solution for the stochastic problem.

We first conduct some experiments in order to determine the best parameter settings for the improvement heuristics (LO, SI, PS, MS) and meta-heuristics (TS, SA). All of these heuristics use the solution of the SOF heuristic as an initial solution.

The MS heuristic is considered with a number of restarts equal to  $N$  (number of patients) multiplied by a parameter  $param$  set to 500, 1000, 1500; the parameter  $\beta$  is set to 0.01, 0.25, 0.5, 0.7, and 1. Parameters leading to the best results were:  $\beta = 0.01$  and  $param = 1500$ .

For the SA heuristic two variants are tested: with temperature changing at each iteration, and with temperature changing every  $N \times H$  iterations. The cooling factor is used with values  $\alpha \in \{0.95, 0.99, 0.995, 0.999\}$ . The best setting was  $\alpha = 0.999$  with temperature decreasing every  $N \times H$  iterations.

The TS heuristic is tested with the following characteristics: taboo list's size  $S \in \{H, 2H, 3H, 4H\}$  and number of iterations  $NIT \in \{100, 500, 1000, 1500, 2000\}$ . The best parameters are  $S = 4H$  and  $NIT = 2000$ .

In order to evaluate the performance of the different methods, we evaluate for each method the "deviation"  $\Delta$  of the obtained solution from the best solution. The deviation is defined by  $\Delta = (J(\bar{X}) - J(X^{best}))/J(X^{best})$ , where  $\bar{X}$  is the solution provided by the method under consideration, and  $X^{best}$  is the best solution.

Table 1 presents results concerning the performance of the different optimization methods, for problems of the first class ( $W_t$  are exponentially distributed) with different sizes (4, 8 and 12 ORs). For each problem size, we provide

**Table 1**Performances of the different optimization methods; first class problems with  $\tau = 85\%$  ( $\Delta$  in % and CPU in second).

#OR	RS	LOF	SOF	WB1	WB2	LO	SI	PS	MS	SA	TS	MC MIP
4 OR (79.8 elective patients)												
$\Delta_{\max}$	10.61	33.92	6.18	20.38	28.87	2.44	3.54	3.08	2.50	2.62	1.12	0.07
$\Delta_{\text{av}}$	7.55	23.72	4.11	16.39	14.66	2.31	2.74	2.10	1.30	1.41	0.65	0.01
$\Delta_{\min}$	4.60	18.64	2.23	12.27	6.30	1.79	1.96	1.72	0.78	0.91	0.00	0.00
CPU <sub>max</sub>									23.23	7.61	15.79	1800
CPU <sub>av</sub>									20.39	7.25	14.02	1747
CPU <sub>min</sub>									16.44	6.65	11.65	750
8 OR (157.6 elective patients)												
$\Delta_{\max}$	11.57	34.31	6.89	22.41	23.76	3.17	3.89	3.58	2.50	2.62	0.38	0.06
$\Delta_{\text{av}}$	7.81	22.09	4.52	15.03	14.13	2.84	3.01	2.71	1.92	1.88	0.07	0.01
$\Delta_{\min}$	5.06	18.51	2.95	11.49	6.83	1.96	2.16	2.11	1.73	1.62	0.00	0.00
CPU <sub>max</sub>									124.22	30.19	61.40	3600
CPU <sub>av</sub>									109.16	28.93	54.57	3590
CPU <sub>min</sub>									93.32	26.77	47.72	3400
12 OR (234.3 elective patients)												
$\Delta_{\max}$	12.93	39.81	5.69	27.48	28.27	3.70	4.91	4.39	2.94	3.09	0.09	0.24
$\Delta_{\text{av}}$	7.94	28.76	3.95	20.25	17.39	3.40	3.80	3.17	2.17	2.28	0.01	0.13
$\Delta_{\min}$	5.14	22.85	2.90	15.49	9.61	2.48	2.72	2.53	2.06	1.89	0.00	0.00
CPU <sub>max</sub>									376.52	45.96	139.26	7200
CPU <sub>av</sub>									309.62	43.19	120.08	7140
CPU <sub>min</sub>									286.46	41.65	113.16	6003

the average number of patients to plan, and for each method we provide:  $\Delta_{\max}$ ,  $\Delta_{\text{av}}$ ,  $\Delta_{\min}$ —the maximal, average and minimal deviation, respectively; CPU<sub>max</sub>, CPU<sub>av</sub>, CPU<sub>min</sub>—the maximal, average and minimal computation time, respectively. As MC-MIP method is concerned, the computational time budget is limited to 30 min, 1 and 2 h, respectively, for problems with 4, 8 and 12 ORs. All computational results presented are based on 20 randomly generated instances for the problem size under consideration.

From Table 1, we observe that best solutions are usually found by the MC-MIP method (it has a very small deviation), and hence it outperforms all the other heuristic and meta-heuristic methods. This illustrates the exponential convergence of the method and shows the benefits of using Monte Carlo simulation to approximate the stochastic problem by a deterministic linear problem. Indeed, even with a modest number of samples ( $K = 1000$ ), solutions obtained from the approximated problem are better than those found by a straightforward solution of the stochastic problem found by numerous heuristics and meta-heuristics. However, the drawback of MC-MIP method is its computation time which is considerably larger than the heuristic methods and quickly increases with respect to the problem size.

As illustrated in Table 1, LOF method is the worst heuristic among the constructive heuristics (i.e., RS, LOF, SOF, WB1, WB2) and SOF is the best one. For this reason solution provided by SOF method is used as initial solution for the improvement heuristics (LO, SI, PS, MS) and meta-heuristics (TS, SA). We also observe that the LO method is always better than the SI method despite of

their similarities. It can also be noted that the PS heuristic always outperforms (LO). The computation time of constructive and improvement heuristics (except MS) is very small about one second.

The MS heuristic is a stochastic method which investigates a large number of initial solutions and picks the best one. From Table 1, we can notice that it is slightly better than the other improvement heuristics; however, it takes a much larger computation time.

The SA method provides good solutions; but it does not outperform the MS method.

We also observe that TS is the best method among all the heuristic and meta-heuristic methods. TS achieves very good performances; it provides near optimal solutions in a short computation time. For some instances, TS provides solutions better than those provided by the “exact” method MC-MIP. We recall that MC-MIP is an *almost* exact method, furthermore the computation time budget is limited, i.e., for some instances the optimal solution of the approximated problem may not be obtained within the computation time budget. This situation is more likely to occur when the size of problems increases.

As the number of ORs (problem size) increases, performances of heuristic and meta-heuristic methods (except TS) deteriorate; deviations to the best solution increase. Meanwhile, performances of TS go better, and the latter outperform the MC-MIP method.

We have also tested the different optimization methods with problems having the percentage  $\tau$  equal to 100%. Computational results show that computation times are slightly larger, since there are more elective cases to plan,

but they confirm the behavior of the different solution methods.

In the next experiments, we compare the performance of improvement heuristics (LO, SI, PS, and MS), meta-heuristics (SA, TS) and MC-MIP method with regards to the distribution function of the emergency capacity requirements ( $W_t$ ). Three classes of problem are considered;  $W_t$  are exponentially distributed for the first class, normally distributed for the second class, and deterministic for the third class. Problem instances with 4ORs and  $\tau = 85\%$  are used for the experiments. The difference between instances belonging to different classes concerns only the characteristics of emergency capacity requirement  $W_t$ . For these instances, the average number of elective patients to be planned is 79.3.

Results concerning the performances of optimization methods are presented in Table 2; they are based on 20 randomly generated instances for each problem class. The MC-MIP method has its computational time budget limited to 30 min.

For problems of the first class the variability of the emergency capacity requirement  $Var(W_t) = E[W_t]^2$ , for the second class  $Var(W_t) = 0.25 \times E[W_t]^2$ , and finally  $Var(W_t) = 0$  for the third class. So the variability of  $W_t$  is decreasing from the first class to the third class.

From Table 2, we observe that, for all heuristic methods, deviations ( $\Delta_{max}$ ,  $\Delta_{av}$ , and  $\Delta_{min}$ ) increase as the emergency requirement's variability decrease. This means that problems become more difficult when  $Var(W_t)$  decreases, and therefore heuristic methods provide solutions far away from the optimum. Nevertheless, TS

remains the best heuristic method and still providing solutions with good quality.

To sum up, the "exact" method (MC-MIP) achieves the best performance; it provides almost optimal solutions for the stochastic planning problem by solving an approximate deterministic linear problem (the sample average problem,  $P_k$ ). However, since it relies on a mixed integer program its computation time is large and considerably increases as the problem size increases. Therefore, for an approximate solution of the stochastic planning problem, TS method seems to be the most appropriate heuristic method; it provides good solutions in a short computation time.

In the literature, several papers suggest the use of an adaptively sized taboo list in order to improve the performances of TS. Basically, this approach consists on modifying, randomly or according to some given scheme, the number of taboo moves after a fixed number of iterations. This issue was not addressed in the paper, but it represents an interesting perspective worthy of further investigations.

### 7. Conclusion

In this paper several optimization methods were proposed and compared for the elective surgery planning problem when operating room (OR) capacity is shared by elective and emergency surgery.

The planning problem has been formulated as a stochastic optimization problem. An "exact" solution method combining the Monte Carlo sampling technique and mixed integer programming has been presented. The convergence of this Monte Carlo optimization method has been investigated. We proved that this solution converges exponentially fast to a real optimal solution and the convergence rate is maximized, i.e., the method can efficiently find an optimal solution by using a modest number of samples.

Several heuristic methods have been also proposed for the planning problem. "Exact" and heuristic methods were evaluated through numerical experiments. The best method is the Monte Carlo optimization method. The taboo search method is the best heuristic among all the heuristic methods. Furthermore, it provides near-optimal solutions in a short computation time for problems with realistic size. We also observed that the quality of heuristics' solutions degrade as the uncertainty's variability decrease, i.e., the stochastic problem is easier than the deterministic one.

The planning model used in this paper does not consider under-utilization costs. However, the optimization methods can be easily adapted to take into account both over-utilization and under-utilization costs.

Extension of the model to take into account various real-world constraints such as limited overtime capacity, assignment of patient to ORs, different types of ORs, random operating time is a direction of future research. The development of other heuristics based on more sophisticated strategy such as Lagrangian relaxation or column generation is another important direction.

**Table 2**  
Performances of optimization methods with regards to the probability distribution function of the emergency capacity requirements; problem instances with 4 OR and  $\tau = 85\%$  ( $\Delta$  in % and CPU in second).

	LO	SI	PS	MS	SA	TS	MC-MIP
<i>W<sub>t</sub> ~ Exp(4.8)</i>							
$\Delta_{max}$	2.44	3.54	3.08	2.50	2.62	1.12	0.07
$\Delta_{av}$	2.31	2.74	2.10	1.30	1.41	0.65	0.01
$\Delta_{min}$	1.79	1.96	1.72	0.78	0.91	0.00	0.00
CPU <sub>max</sub>				23.23	7.61	15.79	1800
CPU <sub>av</sub>				20.39	7.25	14.02	1747
CPU <sub>min</sub>				16.44	6.65	11.65	750
<i>W<sub>t</sub> ~ N(4.8, 2.4)</i>							
$\Delta_{max}$	5.23	5.48	3.68	4.18	3.97	1.87	0.00
$\Delta_{av}$	3.40	3.96	3.25	2.16	2.29	0.84	0.00
$\Delta_{min}$	2.10	2.02	1.26	1.10	1.43	0.08	0.00
CPU <sub>max</sub>				597.43	197.59	321.83	1800
CPU <sub>av</sub>				518.59	187.31	281.65	1700
CPU <sub>min</sub>				446.77	174.85	251.35	1338
<i>W<sub>t</sub> = 4.8</i>							
$\Delta_{max}$	8.10	10.57	6.02	6.80	7.32	5.31	0.00
$\Delta_{av}$	5.54	6.81	4.41	4.92	4.65	2.63	0.00
$\Delta_{min}$	1.83	2.89	1.52	2.46	1.54	0.91	0.00
CPU <sub>max</sub>				93.07	52.42	41.01	1800
CPU <sub>av</sub>				82.13	50.25	36.85	1720
CPU <sub>min</sub>				68.95	46.71	32.26	1551

## Appendix

In this Appendix Lemmas 2 and 3 and Theorem 3, used for convergence proofs of Monte Carlo optimization method, are provided.

Consider a sequence of i.i.d random variables  $\{y_n, \forall n \geq 1\}$ . Let  $Y_n = \sum_{i=1}^n y_i$ ,  $M(\lambda) = E[\exp(\lambda y_1)]$ ,  $A(\lambda) = \log M(\lambda)$  and  $A^*(z) = \sup_{\lambda \geq 0} \{\lambda z - A(\lambda)\}$ , where  $M(\lambda)$  is the moment generating function and  $A^*(z)$  is the Fenchel–Legendre transform of  $A(\lambda)$ .

**Lemma 2.** (Xie, 1997; Lemma 4.3): *If  $M(\lambda)$  exists in a neighborhood  $(-\varepsilon, \varepsilon)$  of  $\lambda = 0$  for some  $\varepsilon > 0$ , then*

- $P\{(Y_n/n) \geq z\} \leq \exp(-n A^*(z)), \forall z \geq E[y_1]$
- $P\{(Y_n/n) \leq z\} \leq \exp(-n A^*(z)), \forall z \leq E[y_1]$ .

**Lemma 3.** (Dembo and Zeitouni, 1993; Lemma 2.2.5): *If  $M(\lambda)$  exists in a neighborhood  $(-\varepsilon, \varepsilon)$  of  $\lambda = 0$  for some  $\varepsilon > 0$ , then*

- $A(\lambda)$  is a convex function
- $A(\lambda)$  is differentiable over  $(-\varepsilon, \varepsilon)$  and  $A'(0) = E[y_1]$ .

**Theorem 3.** (Dai and Chen, 1997, Theorem 2.1): *Let  $Z_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , be random variables and  $g(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$  right-continuous and superadditive function. Then,  $E[g(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)]$  is maximized by sampling all  $Z_i$  using the scheme of common random numbers.*

## References

- Aarts, E.H.L., Korst, J.H.M., 1989. Simulated Annealing and Boltzmann Machines. Wiley, New York.
- Beliën, J., Demeulemeester, E., 2007. Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy. *European Journal of Operational Research* 176, 1185–1204.
- Beliën, J., Demeulemeester, E., 2008. A branch-and-price approach for integrating nurse and surgery scheduling. *European Journal of Operational Research* 189, 652–668.
- Combes, C., Meskens, N., Rivat, C., Vandamme, J.P., 2008. Using a KDD process to forecast the duration of surgery. *International Journal of Production Economics* 112, 279–293.
- Dai, L., Chen, C.H., 1997. Rates of convergence of ordinal comparison for dependent discrete event dynamic systems. *Journal of Optimization Theory and Applications* 94, 29–54.
- Dembo, A., Zeitouni, O., 1993. Large Deviations Techniques and Applications. Jones and Bartlett, Boston.
- Denton, B., Gupta, D., 2003. A sequential bounding approach for optimal appointment scheduling. *IIE Transactions* 35, 1003–1016.
- Denton, B., Viapiano, J., Vogl, A., 2007. Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty. *Health Care Management Science* 10, 13–24.
- Dexter, F., Macario, A., Traub, R.D., Hopwood, M., Lubarsky, D.A., 1999. An operating room scheduling strategy to maximize the use of operating room block time: computer simulation of patient scheduling and survey of patients preferences for surgical waiting time. *Anesthesia & Analgesia* 89, 7–20.
- Fei, H., Chu, C., Meskens, N., Artiba, A., 2008. Solving surgical cases assignment problem by a branch-and-price approach. *International Journal of Production Economics* 112, 96–108.
- Gerchak, Y., Gupta, D., Henig, M., 1996. Reservation planning for elective surgery under uncertain demand for emergency surgery. *Management Science* 42, 321–334.
- Glover, F., Taillard, E., De Werra, D., 1993. A user's guide to tabu search. *Annals of Operations Research* 41, 3–28.
- Guinet, A., Chaabane, S., 2003. Operating theatre planning. *International Journal of Production Economics* 85, 69–81.
- Hans, E.W., Wullink, G., Houdenhoven, M.V., Kazemier, G., 2008. Robust surgery loading. *European Journal of Operational Research* 185, 1038–1050.
- Hoos, H.H., Stützle, T., 2005. Stochastic Local Search: Foundations and Applications. Elsevier/Morgan Kaufmann, San Francisco.
- Hsu, V.N., Matta, R., Lee, C.Y., 2003. Scheduling patients in an ambulatory surgical center. *Naval Research Logistics* 50, 218–238.
- Jebali, A., Hadjalouane, A.B., Ladet, P., 2006. Operating rooms scheduling. *International Journal of Production Economics* 99, 52–62.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., 1983. Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671–680.
- Kleywegt, A.J., Shapiro, A., Homem-de-Mello, T., 2002. The sample average approximation method for stochastic discrete optimization. *SIAM Journal on Optimization* 12, 479–502.
- Lamiri, M., Xie, X., Dolgui, A., Grimaud, F., 2008. A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery. *European Journal of Operational Research* 185, 1026–1037.
- Law, A.M., Kelton, W.D., 1991. Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, New York.
- Liu, L., Liu, X., 1998. Dynamic and static job allocation for multi-server systems. *IIE Transactions* 30, 845–854.
- Magerlein, J.M., Martin, J.B., 1978. Surgical demand scheduling: a review. *Health Service Research* 13, 418–433.
- Marcon, E., Kharraja, S., Simmonet, G., 2003. The operating theatre scheduling: an approach centered on the follow-up of the risk of no realization of the planning. *International Journal of Production Economics* 85, 83–90.
- Ogulata, S.N., Erol, R., 2003. A hierarchical multiple criteria mathematical programming approach for scheduling general surgery operations in large hospitals. *Journal of Medical Systems* 27, 259–270.
- Ozkarahan, I., 2000. Allocation of surgeries to operating rooms by goal programming. *Journal of Medical Systems* 24, 339–378.
- Pham, D.N., Klinkert, A., 2008. Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 185, 1011–1025.
- Ruszczynski, A., Shapiro, A., 2003. Stochastic Programming, Handbook in Operations Research and Management Science. Elsevier Science, Amsterdam.
- Shukla, R.K., Ketcham, J.S., Ozcan, Y.A., 1990. Comparison of subjective versus data base approaches for improving efficiency of operating room scheduling. *Health Services Management Research* 3, 74–81.
- Vissers, J.M.H., Adan, I.J.B.F., Bekkers, J.A., 2005. Patient mix optimization in tactical cardiothoracic surgery planning: a case study. *IMA Journal of Management Mathematics* 16, 281–304.
- Weiss, E.N., 1990. Models for determining estimated start times and case orderings in hospital operating rooms. *IIE Transactions* 22, 143–150.
- Wright, I.H., Kooperberg, C., Bonar, B.A., Bashein, G., 1996. Statistical modeling to predict elective surgery time: comparison with a computer scheduling system and surgeon-provided estimates. *Anesthesiology* 85, 1234–1245.
- Wullink, G., Houdenhoven, M., Hans, E.W., Oostrum, J.M., Lans, M., Kazemier, G., 2007. Closing emergency operating rooms improves efficiency. *Journal of Medical Systems* 31, 543–546.
- Xie, X., 1997. Dynamics and convergence rate of ordinal comparison of stochastic discrete-event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 42, 586–590.



## *M<sub>3</sub>MA-S*: An introduction to a methodological approach for the simulation of distributed industrial systems

S. Galland<sup>a,\*</sup>, F. Grimaud<sup>c</sup>, P. Beaune<sup>b</sup>, J.P. Campagne<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Systems and Transportation Laboratory, University of Technology of Belfort-Montbéliard, Belfort 90010, France*

<sup>b</sup> *Multi-Agent Systems Department, Higher National School of Mines of Saint-Étienne, Saint-Étienne 42023, France*

<sup>c</sup> *Scientific Methods for Industrial Management Department, Higher National School of Mines of Saint-Étienne, Saint-Étienne 42023, France*

### Abstract

We are located in the context of the industrial system simulation, which is complex and distributed in operational, informational and decisional terms. In this article, we present the problems of the simulation of such systems. We propose a methodological approach based on the systemic and on the multi-agent concepts. It authorizes the data-processing and modeling distributions.

© 2003 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

*Keywords:* Industrial system simulation; Multi-agent systems; Methodology; Distribution; Decisional processes

### 1. Introduction

The simulation is a tool adapted to the modern industrial problems. It permits to support and study the dynamic behavior of industrial systems. Even if the simulation is a powerful tool, some problems always exist. We concentrate our work on four kinds of them. First, we assume that the simulation tools are still seldom packaged with a methodology, which allows an easier modeling of an industrial system. The second problem, that we want to tackle, is the poor support of the component modeling or of the modular modeling. It is still difficult to reuse the existing models (or a part of them) without substantial changes or a complete rewriting. The third problem is the

strong relationship between the physical, the informational and the decisional aspects of an industrial system. For example, if we want to simulate a system with a pulled-flow management policy, and just after with a pushed-flow policy, we must completely rewrite the simulation model, even if only the decisional part changed. Why must the rest of the model be rewritten? Finally, the last problem is about the difficult to model the new industrial organizations, such as the enterprise consortiums or the virtual enterprises. To solve these different problems, we propose a methodological approach: *M<sub>3</sub>MA-S*<sup>1</sup> (Galland, 2001). It offers a modeling framework that is independent of any software platform (simulation tool or multi-agent system). In this paper, we present the major

\*Corresponding author. Tel.: +33-3-84583418; fax: +33-3-84-583342.

*E-mail address:* [stephane.galland@utbm.fr](mailto:stephane.galland@utbm.fr) (S. Galland).

<sup>1</sup>Multi-agent methodological approach for the simulation of industrial systems.

concepts attached to our methodology. First, we explain the context in which our works are. In Section 3, we make a brief state of the existing works. In Section 4, we present the life cycle of *M.A.S.* and our major propositions and works on it.

## 2. Context

Since 20 years, the concept of system appears from the works of Von Bertalanffy, Wiener, Shannon, Forrester (Durand, 1975) and De Rosnay (1979): a system is a “whole of interacting elements, which are organized to reach a goal”. More precisely, we are interested by the class of the manufacturing systems defined as the “centers that transform raw material to final products by using a whole of resources (processing units, operators, raw material, storage areas, etc.)” (Dupont, 1998; Ye, 1994). During their design and their use, some structural, functional and organizational problems appear (sizing, working, productivity, maintenance, resource management, and scheduling) (Grimaud, 1996). To solve these problems, the system managers have some possibilities. One of them is the discrete-event simulation. It allows “to imitate, in the time, the operations of a process or a real system. The simulation implies the generation of an artificial evolution of the system, and the observation of this evolution to carry out deductions on the operational characteristics of the real system represented” (Banks, 1999; Law and Kelton, 1991). Moreover, it supports the stochastic phenomenas and the dynamics of the systems.

In this context, we are especially interested about the support of the new industrial organizations. For example, one of them is the enterprise consortium, which is “a whole of companies related the ones to the others by a cycle of production. The bond is neither legal, nor structural; it has often the form of simple agreements. These companies have in common a powerful system of functional cooperation” (Butera, 1991). Some other kinds of organizations exist: virtual enterprise (Goranson et al., 1997;

Ettinghoffer, 1992), network of enterprises (Nunes, 1994), etc.

In the following sections, we present the four major problems that we want to tackle, and our propositions to solve them.

### 2.1. Problems

We consider four main classes of problems, which occur during the design and the simulation process:

*Formalization:* A problem, that occurs during the modeling phase, is the poor formal definition of the modeling elements and rules. The simulation tools have a strong influence to the point of view of the designers. For example, the tools AREN<sup>®</sup> and SIMPLE++<sup>®</sup> offer two different modeling views. Then, the change of simulation tools applies the complete rewriting of the simulation models. This formalization problem is partly solved by the existing methodologies or languages, e.g., ASCI<sup>2</sup> (Kellert and Force, 1998; Kellert and Ruch, 1998), CM<sup>3</sup> (Nance, 1981), IDEF (US Air Force, 1993) or UEML<sup>4</sup> (Vernadat, 2001). But, they do not propose any element that permits to support a distributed industrial system. Moreover, the underlying simulation models, e.g., the Petri nets (David and Alla, 1992; Wang, 1998) or the queuing theory (Knuth, 1998), offer tools adapted to simulation (Zimmermann, 1994). But, they must be used by specialists and are not really usable in an industrial context.

*Highlight of flows and subsystems:* An industrial system is composed of physical and informational flows. They are different, even if they are strongly interacted. Currently, the simulation models include these two kinds of flows, but they do not highlight each of them. The understanding of a simulation model is still difficult because a significant effort must be done to distinguish the flow of entities and the flow of information.

Another problem is highlighted when a designer wants to change one of the flows. For example, when the management policy passes from a pulled

<sup>2</sup>Analyse Spécification Conception Implantation.

<sup>3</sup>Conical Methodology.

<sup>4</sup>Unified Enterprise Modeling Language.

one to a pushed one, the designer must completely rewrite the simulation model, even if only the decisional part of the system changed. In an ideal world, only the decisional part must be updated.

*Distribution:* A problem, which appears in the methodologies and the simulation tools, is the distribution of the models and of the simulation process. In the first case, it is difficult, with the simulation tools and the existing models, to realize the simulation of a strongly distributed manufacturing system (such as an enterprise consortium). For example, the confidentiality needed by this kind of system does not permit to realize a centralized simulation. The second case of distribution corresponds to the realization of the simulation process on a computer network. The main problem is the solving of a whole of technical constraints such as the synchronization of the models.

*Reuse:* The forth problem is the poor modularity of the simulation models. In fact, even if the concepts of model and submodel exist, it is still difficult to build a modular simulation model. For example, the reuse of an existing submodel applies to copy and paste it into an another model. This copy does not support the automatic update of all the instances of the copied submodel when it changed.

Our goal is to allow the simulation of a manufacturing system, which is complex and distributed (enterprise network, strongly distributed enterprise, etc.). We are interested by the systems which always include a distribution aspect. But, we are not limited to the distribution on a computer network. In fact, our interest is also on the distribution of the information and of the decision-making processes. But, the existing tools do not support these two last aspects. Moreover, they are domain dependent, e.g., ARÉVI for virtual representation of systems (Duval et al., 1997; Chevaillier et al., 1997), SWARM for simulation of artificial way of life (Burkhart, 1994); or they only include one aspect of the distribution, e.g., HLA<sup>5</sup> (US Department of Defense, 1996) is a architecture that supports the interoperability of models. In another point of

view, the underlying models for simulation (Petri nets, queuing theory, etc.) and the distributed simulation techniques are partly adapted to the simulation of distributed industrial systems. In fact, even if they permit to realize the simulation process, they do not really support the specific constraints of the distributed systems (confidentiality, evolution's dynamic, etc.).

## 2.2. Propositions

The previous problems drive us to propose a methodological approach named *M<sub>s</sub>M<sub>A</sub>-S* (Galland, 2001). This approach proposes a methodological framework for simulation and a software architecture. This last is based on the concepts from the multi-agent systems (Ferber, 1995). In fact, the autonomy and the interactional capabilities of agents allow the distribution of the physical, the informational and the decisional subsystems. In the case of a cognitive agent (in opposition to a reactive agent), the cognitive mechanisms permit to support the decisional processes. Moreover, the modularity, which is borned from the use of a multi-agent system, allows to respond to an another crucial point for an industrial point of view: the reuse of knowledge and of the tools that are already used.

Fig. 1 is a schematic illustration of the multi-agent architecture that we propose. It is composed of simulation models that represent industrial systems. The models are interconnected with an agent's society.

If we consider the two distribution aspects (on the simulation process and on the method), we can describe our contribution as the following:

- *Centralized simulation, centralized method:* Our methodology allows a more powerful use of submodels. It also permits a better understanding of the simulation model in order to distinguish the different kinds of flows in the manufacturing system.
- *Centralized simulation, distributed method:* *M<sub>s</sub>M<sub>A</sub>-S* can contribute to support and facilitate the merging of simulation models. Moreover, it will propose a formal framework

<sup>5</sup>High Level Architecture.

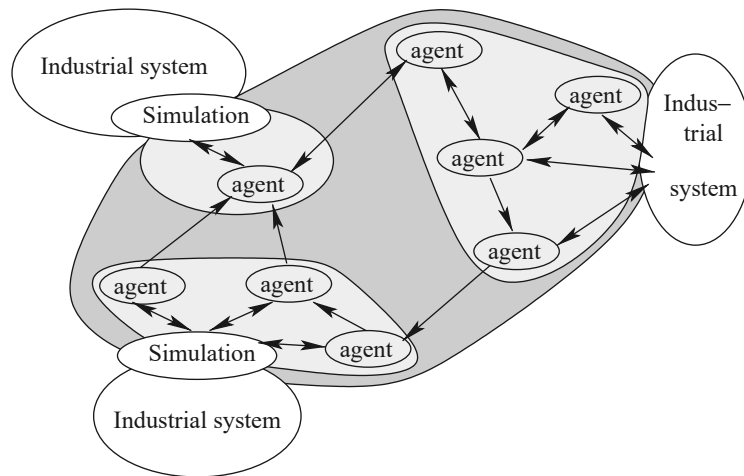


Fig. 1. Example of a multi-agent system for distributed simulations.

in which communication capabilities between designers could be defined.

- *Distributed simulation, centralized method:* This point of view is used by SWARM (Burkhart, 1994) and ARÉVI (Duval et al., 1997). Our methodology proposes a formal framework and an architecture to support the communication between the simulation tools which cannot interact naturally. This approach is also adopted by HLA (US Department of Defense, 1996).
- *Distributed simulation, distributed method:* This is the natural point of view of  $M_{SA}MA-S$ . In this case, our methodology permits to respond to all the problems from the three previous points. Moreover, it supports the new industrial organizations.

### 3. State of the art

In this section, we present a brief state of the works on the three domains that influence our works: the modeling of enterprise, the simulation and the multi-agent systems.

#### 3.1. Modeling of enterprise

This domain aims to model the enterprises (Vernadat, 2001). It has a natural influence on

$M_{SA}MA-S$ . In fact, our methodology has the purpose to support the new enterprise organizations, and the modeling of enterprise has the major goal to model this kind of structure. We study some methods and languages that are used in this domain. This work permits to highlight the concepts that must be supported by  $M_{SA}MA-S$ . In the following points, we briefly discuss the advantages and the defaults of each of them according to our problems.

##### 3.1.1. General methods

Behind this term of “general method”, we put the methods and the methodologies that permit to model all the enterprises in a global way. For example, CIMOSA (AMICE, 1993; Vernadat, 1998), PERA (Williams, 1994) and UEML (Vernadat, 2001) support all the aspects of an enterprise.

However, because these methods are based on an activity modeling, they cannot be directly used in our approach. In fact,  $M_{SA}MA-S$  is a simulation method that must support more low-level concepts such as queues, processing units, resources, etc.

From this kind of method, we take a systemic approach to model the industrial systems (a system is composed of a physical, an informational and a decisional subsystem) (Le Moigne, 1977).

### 3.1.2. Information system methods and languages

The computer science produces a lot of methods and languages that can be used to model the information system of an enterprise: MERISE (Tardieu et al., 1985), UML (Booch et al., 1997), etc.

We extract from them the object modeling concepts and their life cycles (if they exist).

### 3.1.3. Specialized languages

Some languages are developed to support the specific aspects of an enterprise. For example, the IDEF (US Air Force, 1993) suite proposes a set of languages that includes IDEF0 (activity modeling) and IDEF1 (information modeling).

All these languages are interesting, but as for the general methods, they do not have the right modeling level.

## 3.2. Simulation methodology

The simulation is the natural domain of our methodological approach. We studied two simulation methodologies: CM (Nance, 1981) and ASCII (Kellert and Force, 1998; Kellert and Ruch, 1998).

The Conical Methodology (CM) is one of the oldest simulation methodologies. Its interest is in its modeling framework (life cycle, modeling stages, etc.), which inspires the *M.A.S.*'s framework (and especially the life cycle).

The ASCII methodology proposes a way to distinguish the three subsystems of an industrial system according to the systemic approach proposed by Le Moigne (1977). Moreover, some interesting concepts are supported (human resources, etc.).

Even if they are expressive, these methods do not propose a natural way to model a distributed industrial system. To tackle this problem, our methodological approach uses the multi-agent systems, which are presented in the following section.

## 3.3. Multi-agent systems

The multi-agent systems (MAS) are a new modeling paradigm inherited from the object modeling and from the distributed artificial

intelligence (Ferber, 1995; Gasser, 1991). A multi-agent system is a “distributed system composed of a whole of agents interacting according to modes of cooperation, competition and coexistence (Chaib-draa, 1994; Chaib-draa, 1996; Moulin and Chaib-draa, 1996). A MAS is distinguished from a collection of independent agents by the fact that the agents interact in order to carry out a task jointly or to achieve a particular goal jointly” (Chaib-draa et al., 2001).

The multi-agent systems are very interesting for the following reasons:

*Decisional process modeling:* The cognitive and interaction capabilities of the agents permit to model and simulate the decisional processes of an industrial system (Bournez, 2001; Kabachi, 1999; Burlat, 1996);

*Simulation model distribution:* Because the MAS are naturally distributed, the agents can support the distribution of the simulation models (Duval et al., 1997);

*Modular modeling:* The autonomy of the agents allows to our methodology to be more modular and to support a component modeling approach (Chen and Szymanski, 2001; Barbuceanu and Fox, 1995). In fact, the opening of MAS (Vercouter, 2000) could be a good way to support this feature. For example Vercouter (2000) proposes an architecture that permits to agents to enter or exit from a MAS at any time. This architecture can be adapt to support a modular modeling.

According to the different points from this section, we decide to propose a methodological approach, which is presented in the rest of this paper.

## 4. Methodological approach

In this section, we present the first results on our methodological approach. We successively expose the life cycle of the models, and his major stages.

### 4.1. Life cycle

The development of a methodological approach passes by a first major stage: the definition of the life cycle of the models. We devote this section to

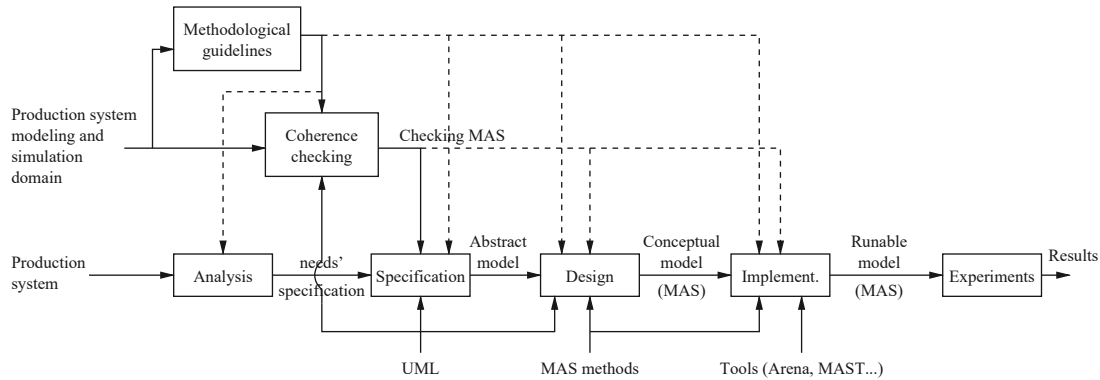


Fig. 2. Life cycle.

define this life cycle for the models of distributed industrial systems. Starting from the assets of the software engineering (Sommerville, 1998; Ghezzi et al., 1991) and the works already completed in the field of simulation (Nance, 1981; Kellert and Force, 1998; Kellert and Ruch, 1998), we propose to extend the existing approaches to take the new enterprise organizations into account.

Fig. 2 illustrates the life cycle used by *M.A.M.A.-S*. It is based on the classical life cycles (from the CM (Nance, 1981) for instance). Our contributions are restricted to the adaptation of the specification, the design, and the implementation (which are presented in the following sections). We also introduce two special stages: the methodological guidelines and the coherence checking.

#### 4.1.1. Analysis

Let us recall that, within the framework of the software engineering, the analysis is the phase where the functionalities of the system and the nonfunctional constraints must be described. For the simulation, the methodologies specialize these principles by considering that the needs' specification (produced during the analysis) must contain the abstract description of the modeled system. This description includes all information which seems necessary to the implementation of a simulation process: the description of the physical infrastructures (storage areas, processing units, etc.), the information needed to the simulation (bill of material, manufacturing routing, etc.), the

information needed to drive the system (management policies, production orders, etc.), a list of experiment plans, the specification of the simulation goals.

Unfortunately, the problem of the information harvest is complex and is not yet the subject of a consensus within the community. From this heterogeneity, we decided to not tackle this problem in our works. We suppose that the phase of analysis produces the information necessary to the phase of specification.

#### 4.1.2. Specification

The specification within a simulation context is the translation of the information from the needs' specification in a formal model. Indeed, the phase of analysis does not allow to obtain a formal model. It is necessary to examine the information of the needs' specification and to build a model by using a method or a technique based on a formal approach. The formalisms and the methods strongly depend on the methodological approach: for example, ASCI uses the directed diagrams Entity-Association-Attribute (EAA) and the object diagrams. If we take a methodology resulting from modeling of enterprise like CIMOSA (Zelm et al., 1995; Vernadat, 1998), the specification partially corresponds to the modeling level of the design specification. In addition, the concepts used to model an industrial system on this level are also specific to the used methodological approach. The specification stage is described in Section 4.2.

#### 4.1.3. Design

The phase of design consists in the building of a data-processing model (also called conceptual) which describes in a more precise way the model resulting from the specification. The objective is not to choose the infrastructures of the data-processing execution. But, it is to build a model independent of any tool and any software platform. Thus, only the implementation choices that not influence the choice of the physical infrastructures are carried out. In general, this phase is reduced to nothing (Conical Methodology (Nance, 1981)) or is confused with the phase of implementation (ASCI (Kellert and Force, 1998; Kellert and Ruch, 1998)).

Within the framework of *M.A.M.A.-S*, we consider that the phase of design is significant. Indeed, we decided to not introduce the multi-agent systems (MAS) during the phase of specification because, as the methodologies presented in Section 3 illustrate it, we think that the choices of implementation must be hidden as much as possible to the user of the methodology. We consider that the design is the phase during which an MAS modeling could be introduced. The use of the MAS is not in contradiction with the definition of the design resulting from the software engineering (Sommerville, 1998; Ghezzi et al., 1991). Indeed, the selected MAS modeling approach (the approach “Vowels” (Demazeau, 1995; Demazeau, 1997)) is independent of any software implementation. Consequently, we can create a multi-agent model respecting this approach without choosing a platform of execution (mast, AALAADIN, etc.). In Section 4.3, we describe in detail this phase of design.

#### 4.1.4. Implementation

The implementation is the translation of the model resulting from the design on a particular software platform. In general, the methodologies propose a specific tool to carry out the simulation process: AREN<sup>®</sup> (Kelton et al., 1998), SIMPLE++<sup>®</sup> QNAP (Veran and Potier, 1984), etc. The result of this phase is a model which generates a set of results starting from the experiment plans defined during the analysis. We present the phase of implementation in Section 4.4.

#### 4.1.5. Experiments

The phase of experiments is the stage during which the customer uses the simulation model on a set of experiment plans. We do not study this stage in the current state of our works. We assume that the existing works from the other methodologies could be used.

#### 4.1.6. Methodological guidelines

The methodological guidelines are written during this stage. It permits to specify the principles of our methodology (life cycle, modeling elements, methods, etc.) that will be used to build a simulation model. The guidelines are, at the same time, the specifications of *M.A.M.A.-S* and an user guide.

Currently, the guidelines are limited to the specification of *M.A.M.A.-S* from Galland (2001). It will evolve according to the progresses of our works on the methodology.

#### 4.1.7. Coherence checking

The coherence checking is a phase during which a multi-agent architecture was built. It aims to check the coherence of the different simulation models. This stage is not presented in this paper. You must see Galland (2001) for details.

In the following sections, we describe our propositions on the life cycle stages.

### 4.2. Phase of specification

The phase of specification is crucial in our methodological approach. Indeed, it corresponds to the moment when the first model expressed formally must be produced. In this section, we present the methodological bases and the sub-jacent principles of the abstract model’s specification. Initially, we point out the basic concepts of discrete-event simulation. We also describe the UML metamodel (Muller, 1997; Booch et al., 1997) which allows to define the modeling elements. In this article, we do not explain the principles of the discrete-event simulation, which are already presented by Banks (1999), Banks et al. (1996), Carson (1993).

#### 4.2.1. Modeling elements

In this section, we describe the whole of the modeling elements which are used within the framework of the specification for the creation of an abstract simulation model. This building must be carried out starting from the information collected and exposed in the needs' specification. Our methodological approach considers that the distributed production system can be broken up according to the systemic approach proposed by Le Moigne (1992): an operational subsystem, an informational subsystem and a decisional subsystem. We propose modeling concepts for each of these subsystems, as well as a whole of common concepts. The abstract simulation model is composed of three strongly interdependent submodels.

#### 4.2.2. Physical subsystem

*Definition:* The physical subsystem is the whole of the industrial infrastructures of the modeled system. The basic concepts supported by *M<sub>AS</sub>* are partly from Banks (1999), Banks et al. (1996), Carson (1993) and from simulation softwares as AREN<sup>®</sup> (Kelton et al., 1998) or SIMPLE++<sup>®</sup>:

- *Composition:* We include the concepts of model and submodel that already exist in simulation tools. This is necessary because of the more and more complexity of the modeled systems.
- *Critical resource:* We are only interested by the critical resources, i.e., the resources that can stop the physical flow. They are of two categories:
  - *The active resources:* They are used to realize an activity (Banks, 1999). They can be processing units—transformation of products—human resources, storage area, and transport means (conveyors, transporters or roads).
  - *The passive resources:* They are essential to an activity, but they do not give additional value to the products. In most of cases, they are used by the active resources to do these activities.
- *Queue:* The queues are modeling artifacts that represent a list of physical entities. These entities are waiting for an event (active resource

release, activity end, etc.) to continue there paths along the physical flow. The management policy of the queues can be defined in the decisional subsystem.

- *Structuration of the physical flow:* To create a simulation model of the physical subsystem, we propose a set of additional modeling elements. They permit to define the physical paths used by the physical entities:
  - The *links* are the sections of the paths used by the entities to go along the physical flow;
  - The *junctions* and the *forks* permit to simulate cross-roads into the physical flow;
  - The *jumps* are an syntactical simplification for links. They permit to define links without any explicit graphical representation;
  - The *exit points* and the *entry points* allow to the flows outside the current model to enter and exit from it.
- *Distribution:* In this category, we define the whole of modeling elements that permits to distribute simulation models. They are defined in Galland (2001): remote model, remote resource, remote bill of material, remote decision-center, etc.

We define the modeling artifacts in an extension of the UML metamodel. For instance, Fig. 3 shows the definition of a model, a stochastic law, an attribute and a remote objet. First, this metamodel defines a name space (NAMESPACE) as an object that can contain a set of modeling elements (ROOTELEMENT). Each model is defined as an extension of a name space. One type of model is describes for each subsystem (PHYSICALMODEL, DECISIONALMODEL, INFORMATIONALMODEL) and for the entire simulation model, i.e., a model that contains all the others (MAINMODEL). This metamodel also defines the stochastic laws (LAW), and the modeling elements used in each models (SIMULATIONELEMENT).

The physical subsystem metamodel is built in the same way. Fig. 4 illustrates a part of it. It corresponds to the definition of the modeling elements for the transport means. The roads (Route) permit to reach a destination. The

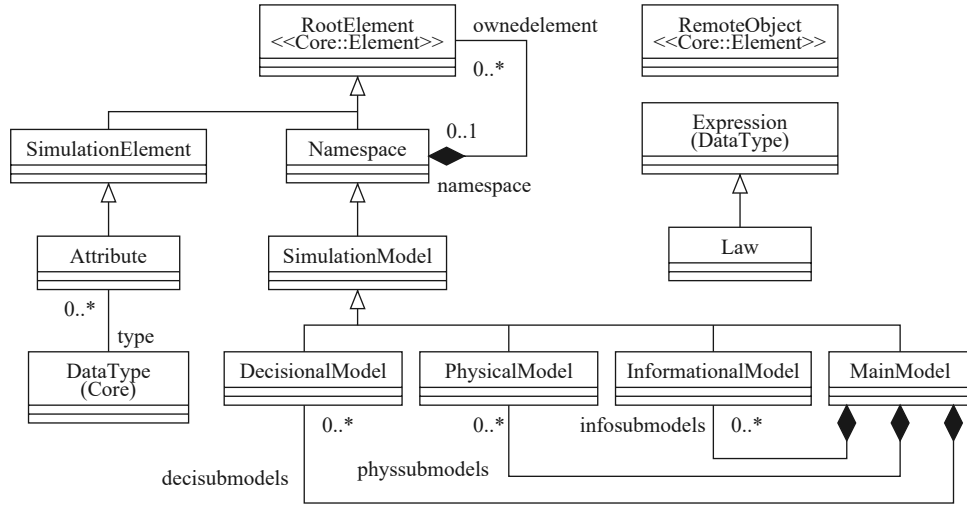


Fig. 3. Part of the common metamodel.

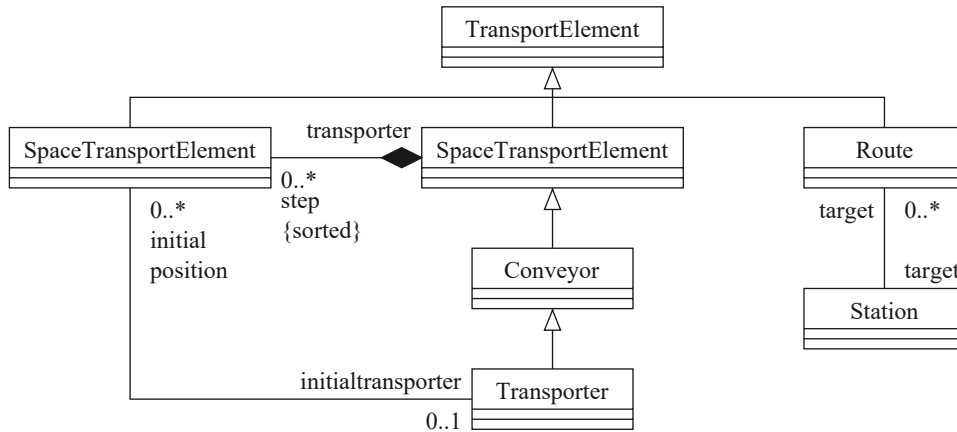


Fig. 4. Part of the physical subsystem metamodel.

elements of type TRANSPORTELEMENT contain a stochastic law for the transport duration. Thus, a road supports the temporal aspect of the transport. The two other kinds of transport means (conveyor and transporter) extend the concept of road by including a spacial aspect. The difference between a conveyor and a transporter is the limitation of the transport resources for the second.

To permit an easier design of the simulation model, we propose a graphical language attached to each object defined in the metamodel. This formalism is described in Galland (2001).

*Example:* To illustrate our remarks on the operational subsystem modeling, we propose to create a model of a simple distributed system: a consortium of three enterprises  $E_1$ ,  $E_2$  and  $E_3$ . The objective of this consortium is to produce movement-detecting cameras. We propose this example in order to facilitate the understanding of the used concepts and to illustrate the use of our methodological approach.

The enterprise  $E_1$  produces sensors in its workshop  $A$ . They are sent to the second enterprise. This last assembles in its workshop  $B$  the sensors with the cases which are locally manufactured.

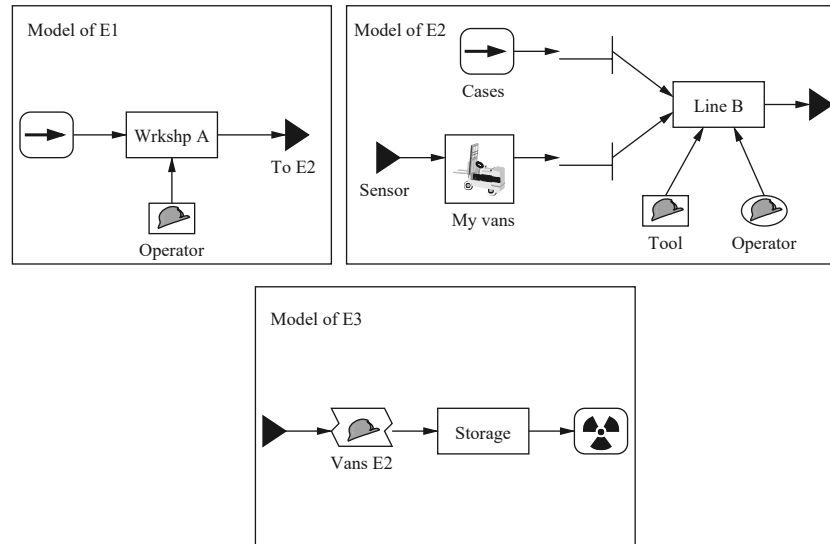


Fig. 5. Example of a physical subsystem model.

Then,  $E_2$  forwards the resulting detectors to the third member of the consortium which must store the final products. The transport between these three enterprises is exclusively carried out by the transport services of  $E_2$ . In addition, the workshop  $A$  uses a critical resource which corresponds to an operator, and workshop  $B$  uses two resources: a critical resource which makes it possible to assemble the cameras, the second is a passive resource representing an operator supervising the tasks of the workshop  $B$ . Moreover, the agreements between the members of the consortium specify that  $E_1$  does not know how the sensors are transported, and that  $E_2$  does not force  $E_3$  to use its transport services. These considerations enable us to put the transport modeling artifacts in the models of  $E_2$  and  $E_3$ . Fig. 5 graphically illustrates the three models.

#### 4.2.3. Decisional subsystem

*Definition:* The decisional subsystem is the whole of the organizational structures and decision-making processes of an industrial system. Our UML metamodel defines a language that permits to describe the relational structures between the *decision-making centers*. The centers can take operational, tactical and strategical decisions.

The relationship between centers can be hierarchic or cooperative. This point of view is issued from the works on the organizational structures in industrial systems (Burlat, 1996; Kabachi, 1999; Berchet, 2000) and in multi-agent systems (Hannoun et al., 2000).

Each decision-making center includes at least one behavioral model. It can be taken in a whole of models where the extremes are protocolar and reactive. A protocolar model uses a communication protocol such as the contract-net protocol. A reactive model defines a set of actions that must be done when stimuli occur.

Fig. 6 shows a part of the decisional subsystem metamodel. It contains the definition of the three types of decision-making centers: operational (OPERATIONALCENTER), tactical (TACTICALCENTER) and strategical (STRATEGICALCENTER). Moreover, we include the definition of the remote centers (REMOTECENTER), which correspond to the centers defined in another simulation model. Each decision-making center can be attached to one or more behavioral models (BEHAVIOURALMODEL).

*Example:* Let us take again the example of the consortium of three enterprises. Here, we are interested exclusively in the decisional subsystem

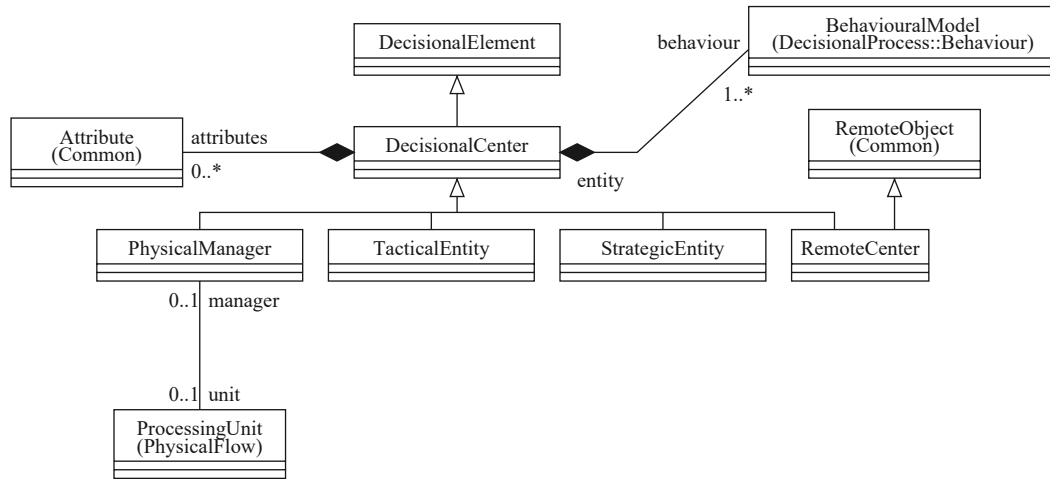


Fig. 6. Part of the decisional subsystem metamodel.

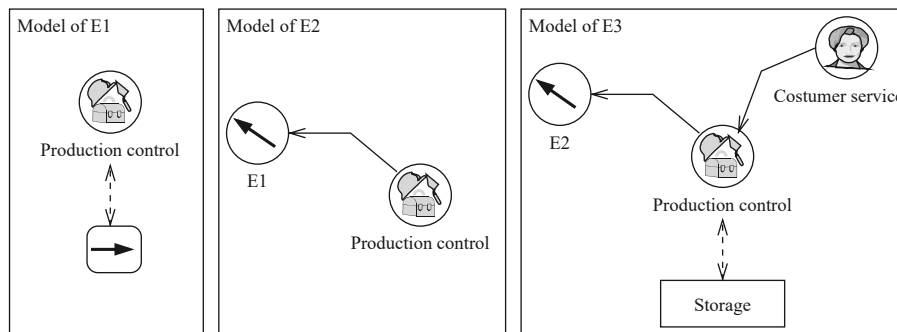


Fig. 7. Example of a decisional subsystem model.

modeling. First, we are interested in the management policy of this consortium. We consider that the system is managed a pulled and with a pushed flow management policy. Indeed, the enterprise  $E_3$  is in direct relation with the “market”. Each time its stock of cameras does not make it possible to answer to an order, this enterprise sending a production order to  $E_2$ . This one has pulled flow management policy. For each production order coming from  $E_3$ , it makes correspond a production order for  $E_1$ . This last launches the production of the number of sensors claimed by  $E_2$ . The production process uses a pulled flow management policy. Fig. 7 illustrates the decisional models for each of the three members of the consortium.

Each decisional center has its own behavior (the language used is defined in Galland (2001)):

*Customer service*: The customer service generates production orders according to a given statistical law. It is a reactive behavior center. Indeed, it reacts only to one temporal event and irrevocably sends a production order to the center of production control. The behavior can be described as follows:

```

CONTEXT ‘‘Customer service’’
WHEN EACH TIME(
    INFORMATION(
        ‘‘law of customer order arriving’’))
THEN
    
```

```

SEND TO 'Production control'
  TYPE ORDER
  NAMED 'Production order'
  DATA INFORMATION('size of the PO');
END

```

*Production control of E<sub>3</sub>*: The production control allows the establishment of the link between the production orders coming from the customer service and the real state of the stock. If this last is too weak to answer to the order, the production control center sends a production order to E<sub>2</sub>. The behavior of this center is:

```

CONTEXT 'Production control'
WHEN RECEIVE 'Production order'
  FROM 'Customer service'
  WITH PARAMS ('quantity to produce')
THEN
  stock state=OPERATION(get_quantity);
  IF stock state < 'quantity to produce'
  THEN
    SEND TO E2
      TYPE ORDER
      NAMED 'Production order'
      DATA 'quantity to produce';
  END IF
END

```

*Production control of E<sub>2</sub>*: This center generates a production order of sensors towards E<sub>1</sub> for each order coming from E<sub>3</sub>:

```

CONTEXT 'Production control'
WHEN RECEIVE 'Production order'
  WITH PARAMS ('size of the PO')
THEN
  SEND TO E1
    TYPE ORDER
    NAMED 'Production order'
    DATA 'size of the PO' *
      INFORMATION(
        bill of material camera,
        'quantity of sensors');
END

```

*Production control of E<sub>1</sub>*: This center generates a physical entity for each sensor having to

be produced. Its behavior can be defined as follows:

```

CONTEXT 'Production control'
WHEN RECEIVE 'Production order'
  WITH PARAMS ('size of the PO')
THEN
  i = 1;
  WHILE(i <= 'size of the PO')
  DO
    OPERATION(generate_entity, INFORMATION(entity));
    i = i + 1;
  DONE
END

```

#### 4.2.4. Informational subsystem

*Definition*: The informational subsystem contains the information used by the two other subsystems. In the modeling language, we define the concepts of *bill of material*, *manufacturing routing and entities* (physical or decisional). Fig. 8 shows the elements that permit to model a manufacturing routing model: production unit, raw material source, etc.

*Example*: Let us take again the example of the consortium presented in Section 4.2.2. Consider the models of bills of materials (cf. Fig. 9). Each enterprise has its own vision of the products. However, the sensor used by E<sub>2</sub> is in fact the definition being in the model of E<sub>1</sub>. We have a simple example of the use of a distant definition of a product. The bill-of-material model of E<sub>3</sub> is the same as the model of the enterprise E<sub>2</sub>.

Consider now the manufacturing routing. In our example, only the first two enterprises must define a manufacturing routing model. Indeed, E<sub>3</sub> does not carry out any transformation on the products. Fig. 9 illustrates the graphical representation which we propose within *M<sub>A</sub>M<sub>A</sub>-S*.

Thus, in E<sub>1</sub>, the raw material (RM) is transformed into sensors by the workshop A, and in E<sub>2</sub>, the cameras are obtained starting from the assembly of the sensors and the cases. Note that, for each manufacturing routing model, the treatment units must be associated to processing units from the operational subsystem (they must have

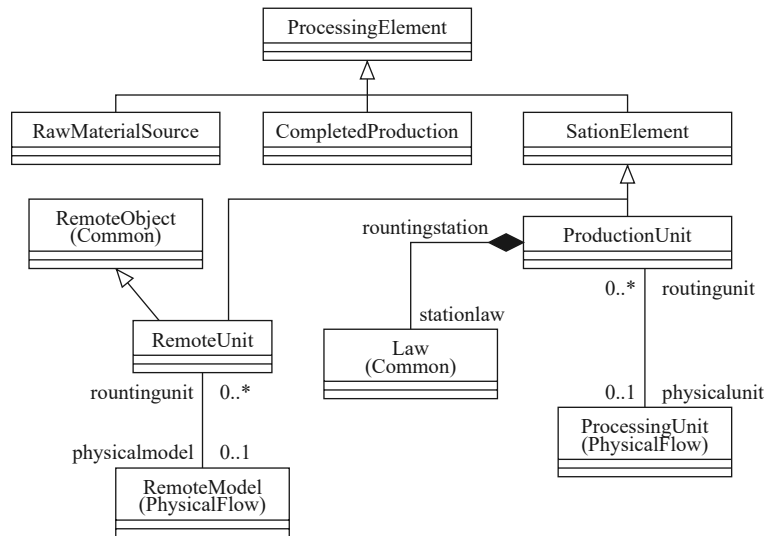


Fig. 8. Part of the informational subsystem model.

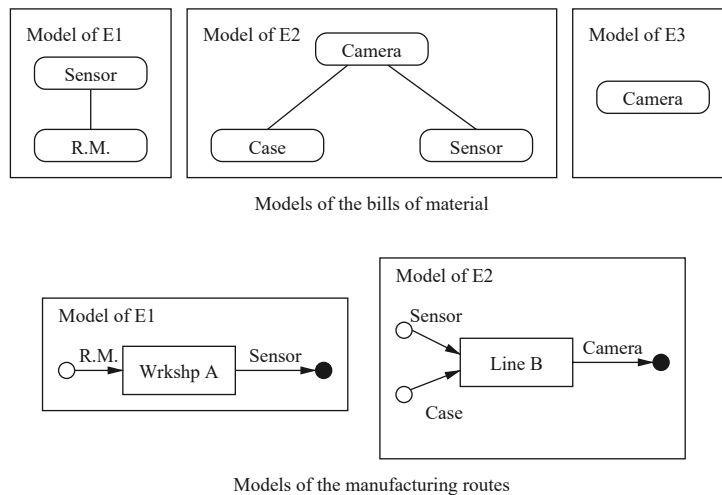


Fig. 9. Example of a informational subsystem model.

the same name). In addition, a treatment must define a whole of times necessary to model the treatments' durations. In the example, all the operations obey to a normal law of average 10 and standard derivation 0.5 (NORMALE(10,0.5)).

In this section, we presented the phase of specification. It allows to obtain an abstract simulation model independent of any software platform. In the following section, we present the phase of design, which permits to build a multi-

agent model that corresponds to the abstract model previously obtained.

#### 4.3. Design

The conceptual model is a multi-agent system (MAS) that corresponds to the abstract model shown in the previous section. It describes a structural organization of agents. But, it does not force to use a particular multi-agent platform or a

particular simulation tool. The only one constraint is that it must respect a specification according to the approach “Vowels” (or AEIO) (Demazeau, 1995).

In the following sections, we describe the MAS context and the two models, which are used to build a multi-agent model, and we illustrate the design on the same example from the previous sections.

#### 4.3.1. Multi-agent infrastructure

To permit the simulation process with an agents’ society, we propose an infrastructure, which is illustrated in Fig. 10. It is mainly composed of interconnected agents. This principle permits to distinguish two classes of agents:

- The facilitators (AGF) facilitate the exchange of messages between simulation agents. They are intermediaries between agents’ subsocieties. Moreover, the facilitators manage a knowledge database of resources and services (resources, processing unit names, decisional centers, etc.). The AGF route a message to an agent which proposes the desired service.
- The agents for simulation (AGS) support the simulation process. We propose an architecture that permits to interact with AGF, with other AGS, or with objects from the MAS environment. Our architecture is a “white box” that

must be filled with the behavior defined in the abstract simulation model.

The facilitators are the only ones agents with a static definition in our approach, i.e., their architecture and their interacts are all defined in *M.A.S.*, and cannot be extend by an user definition. Only AGS can be extend by user models. Fig. 10 illustrates another aspect of our approach: the recursivity of the architecture. In fact, each agent or environment object can be also an agents’ society.

*Definition of facilitators:* We assume that the facilitators are a mean to exchange data between agents. They allow a better modularity of simulation models. They also apply the capability to build a recursive agents’ society. We define a facilitator with the approach AEIO:

- (1) *Facet “Agent”:* A facilitator is composed by a behavioral module that permits to an agent to be a gateway and a facilitator. We assume that the facilitators are friendly (Vercoouter, 2000) with other AGF. Fig. 11 illustrates this architecture:
  - (a) *Knowledge:* Knowledge base needed by the reasoning model: services offered by AGS registered in this AGF, etc.
  - (b) *Friendly knowledge:* Whole of knowledge needed to realize a friendly behavior. This knowledge is divided into two parts: the

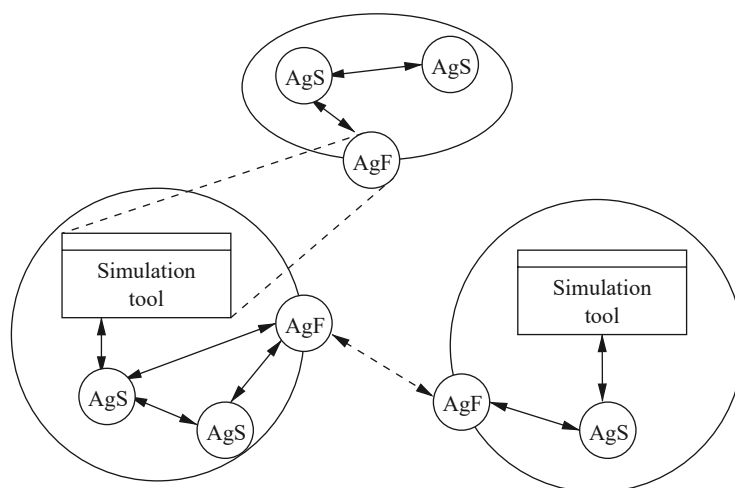


Fig. 10. Simulation model architecture.

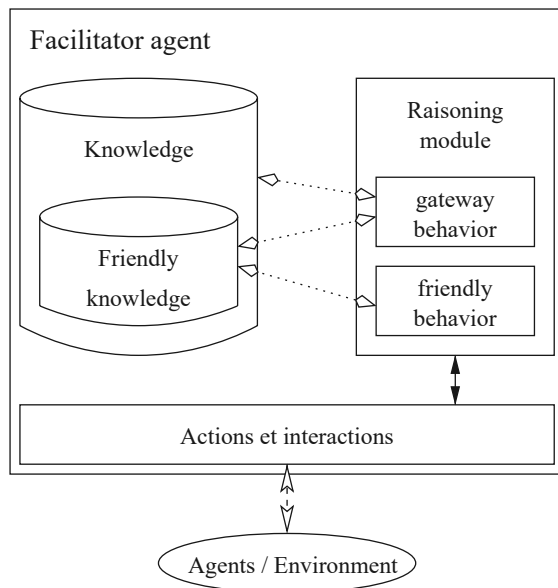


Fig. 11. Architecture of a facilitator.

“model of other AGF” and the common agent knowledge (action or plan semantic, etc.) (Vercouter, 2000).

- (c) *Friendly behavior*: This module permits to agents to be friendly for other facilitators. When an AGF would enter to the system, it present itself to other facilitators with the method proposed by Vercouter (2000). When it is accepted, the agent maintains the coherences of its knowledge about their AGS and about other AGF.
  - (d) *Gateway behavior*: This module permits to agent to be a gateway between agents' subsocieties. It uses the “models of others” from the friendly knowledge.
  - (e) *Actions and interactions*: This module allows to make actions decided by the cognitive process, and to interact with the environment of the agent.
- (2) *Facet “environment”*: The facilitator does not have any relationship with the MAS environment. This facet is ignored in this model.
  - (3) *Facet “interaction”*: The facilitator have two main classes of interaction: interactions with other facilitators, and interactions with agents for simulation. In addition of the friendly

protocols, we define two other protocols:

- the protocol to send messages to other AgF,
- the protocol that manages messages from AgS, which is illustrated in Fig. 12(a).

These protocol use a state-transition graph formalism. The links are labeled with the messages sent (prefixed by +) or received (prefixed by !). Moreover, each message can be postfixed by parameters.

*Other protocols can be used by the facilitators*: Search of a service in facilitators' knowledge databases, etc.

The exchanged messages during the two previous protocols could be expressed with FIPA-ACL (FIPA, 1998), FIPA-SL (FIPA, 2001; Carron et al., 1999).

- (4) *Facet “organization”*: Facilitators are gateways between the agents' societies. They have acquaintances with other facilitators and authority relationships with AGS. The expression of this kind of organization can be done with MOISE (Hannoun et al., 2000).

*Definition of simulation agents*: This kind of agent is not entirely specified in  $\mathcal{M}_{\mathcal{A}}\mathcal{M}\mathcal{A}\mathcal{S}$ . We propose an architectural skeleton of AEIO's facets that permits to the agents to interact with the facilitators, and, in most of cases, with the environment objects. The interaction facet is composed of two protocols: send messages to and receive messages from facilitators. Fig. 12(b) illustrates the protocol, which is used to send messages to AGF.

Our methodological approach also proposes a whole of definitions of simulation agents: agent that send physical entities to another model, resource management center, etc. These different models are directly usable. They are the first level of dedicated object templates.

#### 4.3.2. Some rules to translate the abstract model

To facilitate the building of the MAS model,  $\mathcal{M}_{\mathcal{A}}\mathcal{M}\mathcal{A}\mathcal{S}$  proposes a whole of methodological rules, which permit to translate the abstract model

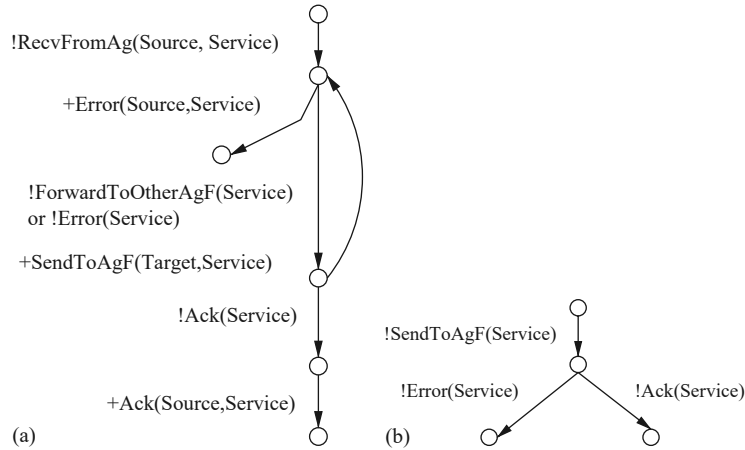


Fig. 12. Protocols for agents.

into a MAS model. These rules are currently under development (Galland, 2001). They respect the following grammar:

```

rules ::= 'AGENT' [ '[' agent_name ']' ]
        '←' abstract_object_name '='
        description ';' rules
        |
        empty
description ::= 'A' '{' pseudo-code '}' '^'
              'E' '{' pseudo-code '}' '^'
              'I' '{' pseudo-code '}' '^'
              'O' '{' pseudo-code '}' '^'
              'U' '{' pseudo-code '}'
agent_name ::= string
abstract_object_name ::= string
    
```

This grammar describes a rule that permit to create an agent named agent name from objects of the abstract simulation model object (abstract object name). This description is based on the approach “Vowels” (Demazeau, 1995), and defines, by the way of pseudo-code, the content of each facet of the new agent. The pseudo-code can have any form, e.g., MOISE for the organization and FIPA-ACL for interaction.

*M.A.S.* propose some simple rules that allow to quickly build a skeleton of MAS model. But, these rules are not exhaustives and must be

updated by *M.A.S.* developers and users (Galland, 2001). For example, we propose the following rule:

RULE 1 :

*We consider that physical production units can be entirely translated into the MAS environment.*

*ENVIRONMENT* ← *ProcessingUnit* =

```

{
  {
    {
      < getState, method, ∅ >,
      < beginProcess, event,
        { {entité, entité, α} } >,
      < endProcess, event,
        { {entité, entité, γ} } >
    }
  }
  < < < < > > >
  < < < delay, Law,
    < "Law_for_" + _name > > >
  < < fail, Law,
    < "Fail_Law_for_" + _name > > >
}
    
```

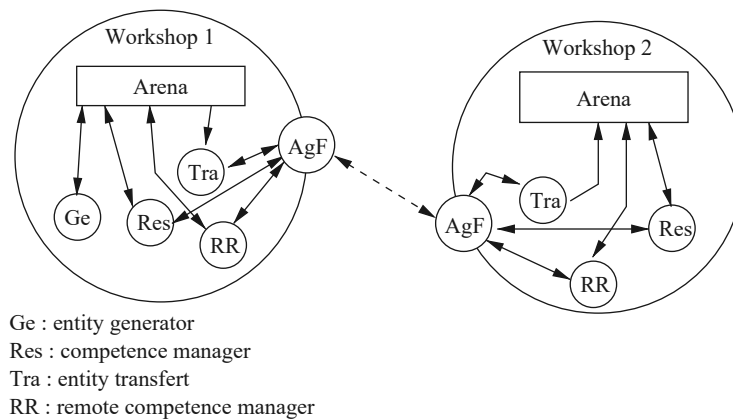


Fig. 13. Example of a multi-agent model.

#### 4.3.3. Example

From the example presented during the specification phase, we want to highlight the following agent classes:

- the agents corresponding to resource management decision centers,
- the agent corresponding to the entity generation center,
- the agents that permits to send physical entities from a simulation model to another,
- the agents representing the “remote” resource managers.

Fig. 13 illustrates the structure of the multi-agent system. *M<sub>SA</sub>-MAS* considers that agents are white boxes, which must be filled with the parts of the abstracts models. The means to interact between agents is proposed by *M<sub>SA</sub>-MAS* (message syntax, service specification, etc.).

#### 4.4. Implementation

##### 4.4.1. Definition

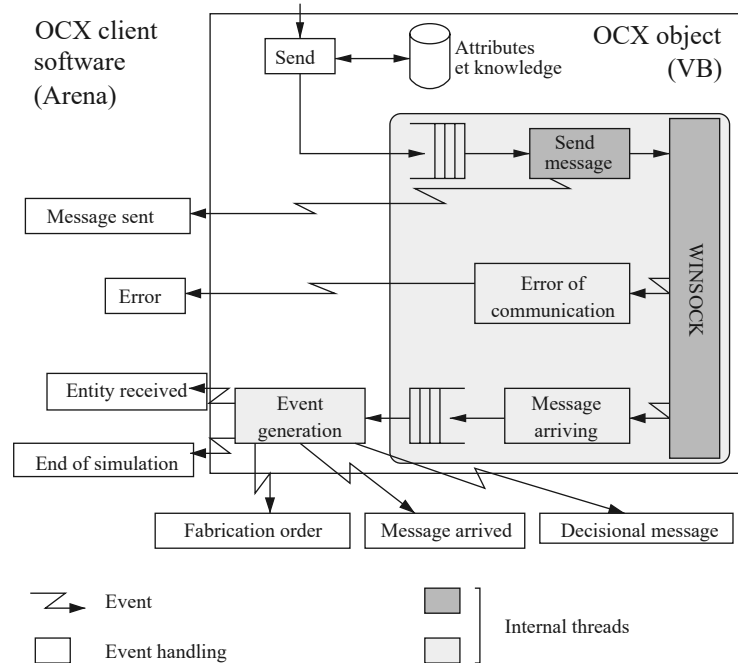
The implementation is the last phase which we want to adapt to the support of the modeling and the simulation of distributed industrial systems. The objective is here to transform the model of multi-agent system previously obtained into a software simulation model. Within this intention, this phase aims to choose the tools which will have

to carry out simulation (ARENA<sup>®</sup> (Kelton et al., 1998), SIMPLE++<sup>®</sup>, QNAP (Veran and Potier, 1984), etc.) and the multi-agent platforms being used as support of the execution of the agents (mast (Boissier et al., 1998), ARÉVI (Duval et al., 1997), SWARM (Burkhart, 1994), AALADIN (Ferber and Gutknecht, 1998), etc.).

To tackle the translation of the multi-agent model, we propose a set of constraints that must be respect by the softwares:

*For the simulation tools:* The simulation tools are objects in the MAS environment:

- They must propose an interface of communication usable by the agents. This interface is based on the exchange of messages. Thus, for each service of the type method (resp. event), the object must be able to treat the reception (resp. the emission) of a tagged message by the name of the service. The syntax used by the messages depends on the selected tools.
- The objects of the environment must establish behaviors compatible with those awaited in the conceptual model.
- Any object is independent of the other objects, except if a relationship is explicitly described in the conceptual model. In this case, the platform must be able to support the relations between the objects.
- The objects should not endanger the course of simulation. Thus, it must be in conformity with

Fig. 14. ARENA<sup>®</sup> ↔ S MAS interface.

the policy of synchronization of the models (the constraints of causality and promptness must be respected).

*For the agents:* The agents result directly from the conceptual model. Thus, the constraints of implementation are common to any multi-agent system:

- autonomy of reasoning of the agents;
- capacities of interaction;
- data-processing distributivity of the system;
- modeling according to the approach Vowels.

To these constraints, we add that the achievements of the agents must respect their conceptual definition: they must exclusively propose and use the same services. The passage from the conceptual model to the software model is much simpler to realize for agents than for the objects of the environment. Note that the agents must respect the protocols and the formats of messages used by the objects of the environment. In addition, we use the same notation to describe the messages exchanged by the various agents (facilitators or not).

#### 4.4.2. Example

The previous multi-agent model example must be instanced. We choose to use the simulation software ARENA<sup>®</sup> with a simple implementation of a multi-agent platform in VISUAL BASIC<sup>®</sup>. Fig. 14 illustrates the architecture of an OCX object, which is used to support interactions between ARENA<sup>®</sup> and the multi-agent system.

To obtain the runnable simulation model, we assume that the physical subsystem is translated into ARENA<sup>®</sup>, the decisional into the multi-agent system, and the informational subsystem into ARENA<sup>®</sup> and the multi-agent system.

## 5. Conclusion and perspectives

In this paper, we propose a methodological approach for the creation of simulation models of complex and distributed systems. This approach, named *M.A.S.*, was introduced in Galland et al. (1999) and Galland et al. (2000a), and specified in Galland (2001). It facilitates the modeling and the simulation of decision-making

processes, whether centralized or distributed. It also provides better reaction capacity in terms of modeling (systemic approach, etc.). Lastly, one of its strengths is its capacity to produce re-usable models. Nevertheless, some applications (teaching application in the simulation scope (Galland et al., 2000b) and cyclic scheduling of a production system (Campagne et al., 2001) enabled us to highlight certain weaknesses in our approach. First of all, collaborative modeling is not fully taken into account by *M.A.M.A.-S*. Indeed, we only propose a basic architecture capable of supporting this approach. In addition, we have yet to propose more highly developed modeling components (dedicated template, etc.), which would make modeling easier. Moreover, this paper presents the first works completed on *M.A.M.A.-S*. It still remains of many points for which a study proves to be necessary (synchronization of the simulation models, methodological guidelines, etc.).

Finally, our methodological approach needs to move towards the attempts at standardization that concern our areas of investigation: (i) the Unified Enterprise Modeling Language (UEML) for modeling distributed production systems, (ii) the Discrete-Event systems Specification (DEVS) to support distributed and interoperable simulation, (iii) the Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) whose aim is to define the set of components of a multi-agent system platform. The previous points are currently being developed within the frame of an extension of the *M.A.M.A.-S* methodological approach.

## References

- AMICE, 1993. CIMOSA: CIM Open System Architecture, 2nd revised and extended edition. Springer, Berlin.
- Banks, J., 1999. Introduction to simulation. In: Winter Simulation Conference, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 7–13.
- Banks, J., Carson, J., Nelson, B., 1996. Discrete Event System Simulation. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Barbuceanu, M., Fox, M.S., 1995. The Architecture of an Agent Building Shell. In: Intelligent Agents II: Agent Theories, Architectures and Languages. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 1037, Springer-Verlag, Berlin.
- Berchet, C., 2000. Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel, Université de Savoie.
- Boissier, O., Beaune, P., Proton, H., Hannoun, M., Carron, T., Vercouter, L., Sayettat, C., 1998. The Multi-Agent System Toolkit, SIC/ENSM-SE.
- Booch, G., Jacobson, I., Rumbaugh, J., et al., 1997. Unified Modeling Language 7 Specifications—version 1.1, UML Consortium—Object Management Group.
- Bournez, C., 2001. Une architecture multi-agents réflexive pour le contrôle de systèmes de production distribus et hétérogènes, Institut National des Sciences Appliquées (Lyon).
- Burkhardt, R., 1994. The SWARM multi-agent simulation system. In: OOPSLA Workshop on “The Object Engine”.
- Burlat, P., 1996. Contribution à l'Évaluation Économique des Organisations Productives: vers une modélisation de l'entreprise-compétences, Université Lyon 2.
- Butera, F., 1991. La métaphore de l'organisation: du château au réseau. In: Les Nouveaux Modèles d'Entreprise: Vers l'Entreprise Réseau., Éditions d'Organisation, Paris.
- Campagne, J.-P., Grimaud, F., Hacid, S., 2001. Production cyclique: Application et évaluation par simulation chez un équipementier automobile. In: 3ème Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation, Troyes, pp. 965–972.
- Carron, T., Proton, H., Boissier, O., 1999. A temporal agent communication language for dynamic multi-agent systems. In: Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, Spain, pp. 115–127.
- Carson, J., 1993. Modeling and simulation world views. In: Winter Simulation Conference, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 18–23.
- Chaib-draa, B., 1994. Distributed artificial intelligence: An overview. In: Encyclopedia of Computer Science and Technology, Vol. 31, Marcel Dekker, New York, pp. 215–243.
- Chaib-draa, B., 1996. Interaction between agents in routine, familiar and unfamiliar situations. International Journal of Experimental and Theoretical AI (JETAI) 1 (5), 7–20.
- Chaib-draa, B., Jarras, I., Moulin, B., 2001. Systèmes multi-agents: Principes généraux et applications. In: Agent et Systèmes Multi-Agents, Hermès, Paris.
- Chen, G., Szymanski, B.K., 2001. Component-based simulation. In: Proceedings of the 15th European Simulation Multiconference, Prague, pp. 68–75.
- Chevallier, P., Querrec, R., Tiseau, J., 1997. Modélisation multi-agents d'une cellule de production. In: 2ème Colloque National de Productique, Casablanca, Maroc, pp. 1–10.
- David, R., Alla, H., 1992. Petri Nets and Grafset—Tools for Modeling Discrete Event Systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Demazeau, Y., 1995. From interactions to collective behaviour in agent-based systems. In: European Conference on Cognitive Science, Saint-Malo, France.
- Demazeau, Y., 1997. Steps towards multi-agent oriented programming. In: Proceedings of the First International Workshop on Multi-Agent Systems (IWMAS), Boston.

- De Rosnay, J., 1979. *The Macroscopic: A New World Scientific System*. Harper & Row Publishers, New York.
- Dupont, L., 1998. *La Gestion Industrielle*. Hermès, Paris.
- Durand, D., 1975. *La systémique*. In: *Que Sais-je?* Presses Universitaires de France, Paris.
- Duval, T., Morvan, S., Reignier, P., Harrouet, F., Tisseau, J., 1997. ARéVi: Une boîte à outils 3D pour des applications coopératives. *La coopération* 9 (2), 239–250.
- Ettinghoff, D., 1992. *L'Entreprise Virtuelle ou les Nouveaux Modes de Travail*. Éditions Odile Jacob, Paris.
- Ferber, J., 1995. *Les Systèmes Multi-Agents—Vers Une Intelligence Collective*. InterEditions.
- Ferber, J., Gutknecht, O., 1998. A meta-model of the analysis and design of organizations in multi-agent systems. In: *Proceedings of the Third International Conference on Multi-Agent systems (ICMAS)*, pp. 128–135.
- FIPA, 1998. *Agent Communication Language*. Foundation for Intelligence Physical Agents.
- FIPA, 2001. The official site of the Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA), <http://www.fipa.org/>.
- Galland, S., 2001. Approche multi-agents pour la conception et la construction d'un environnement de simulation en vue de l'évaluation des performances des ateliers multi-sites. *École Nationale Supérieure des Mines et Université Jean Monnet, Saint-Étienne*.
- Galland, S., Grimaud, F., Beaune, P., Campagne, J.-P., 1999. Multi-agent methodological approach for distributed simulation. In: *Simulation in Industry—11th European Simulation Symposium*, Erlangen, Germany, pp. 104–108.
- Galland, S., Grimaud, F., Campagne, J.-P., 2000a. Methodological approach for distributed simulation: General concepts for *M.A.S.* In: *Simulation and Modelling: Enablers for a Better Quality of Life—14th European Simulation Multiconference*, Ghent, Belgium, pp. 77–82.
- Galland, S., Grimaud, F., Campagne, J.-P., 2000. Multi-agent architecture for distributed simulation: Teaching application for industrial management. In: *Simulation and Modelling: Enablers for a Better Quality of Life—14th European Simulation Multiconference*, Ghent, Belgium, pp. 756–762.
- Gasser, L., 1991. An overview of DAI. In: *Distributed Artificial Intelligence. Theory and Praxis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Ghezzi, C., Jazayeri, M., Mandrioli, D., 1991. *Fundamentals of Software Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Goranson, T., Johnson, M., Presly, A., Rogers, H., 1997. Metrics for the agile virtual enterprise case study. In: *Proceedings of the Sixth Annual National Agility Conference*.
- Grimaud, F., 1996. *Conception d'une base de composants logiciels pour l'évaluation des performances des entreprises manufacturières*, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Hannoun, M., Boissier, O., Sichman, J.S., Sayettat, C., 2000. MOISE: An organizational model for multi-agent systems. In: *Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 1952 (Brazil)*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 156–165.
- Kabachi, N., 1999. *Modélisation et apprentissage de la prise de décision dans les organisations productives*. Université Jean Monnet/ENSM.SE, Saint Etienne, France.
- Kellert, P., Force, C., 1998. Méthodologie de modélisation orientée objets de systèmes de production—application à une chaîne d'étuvage de bobines d'allumage. *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 32 (1), 107–131.
- Kellert, P., Ruch, S., 1998. Méthodologie de modélisation orientée objets de systèmes de production—un processus de construction/validation du modèle générique orienté objets d'un système de production. *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 32 (1), 51–105.
- Kelton, W., Sadowski, R.P., Sadowski, D.A., 1998. *Simulation with Arena*. McGraw-Hill, New York.
- Knuth, D.E., 1998. *The Art of Computer Programming*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Law, A., Kelton, W., 1991. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw Hill, New York.
- Le Moigne, J.-L., 1977. *La Théorie du Système Général. Théorie de la Modélisation*. Presses Universitaires de France, Paris, France.
- Le Moigne, J.-L., 1992. *La Modélisation des Systèmes Complexes*. Editions Dunod.
- Moulin, B., Chaib-draa, B., 1996. An overview of distributed artificial intelligence. In: *Foundations of Distributed AI*. Chichester, England, pp. 3–54.
- Muller, P.-A., 1997. *Modélisation Objet avec UML*. Eyrolles.
- Nance, R., 1981. *Model Representation in Discrete Event Simulation: The Conical Methodology*. Department of Computer Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Nunes, P., 1994. *Formes PME et organisation en réseaux*, INIST-CNRS.
- Sommerville, I., 1998. *Le Génie Logiciel et ses Applications*, InterEditions.
- Tardieu, H., Rochfeld, A., Colleti, R., 1985. *La Méthode MERISE—Tome I: Principes et Outils*, Edition d'Organisation, Paris.
- US Air Force, 1993. *Integrated Computer Aided Manufactured Definition Language (IDEF methods)*. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Computer Systems Laboratory, Gaithersburg, USA.
- US Department of Defense, 1996. *High Level Architecture Federation Development and Execution Process (FEDEP) Model, Version 1.0*, Defense Modeling and Simulation Office.
- Veran, M., Potier, D., 1984. QNAP 2: A portable environment for queuing system modelling. In: *Colloque International sur la Modélisation et les Outils d'Analyse de Performance*, Paris.
- Vercouter, L., 2000. *Conception et mise en oeuvre de systèmes multi-agents ouverts et distribués*. École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne, France.
- Vernadat, F., 1998. *La modélisation d'entreprise par la méthodologie CIMOSA*. In: *Modélisation d'entreprise*

- (CNRS PROSPER “Systèmes de production”), Roisy-en-France.
- Vernadat, F., 2001. UEML: Towards a unified enterprise modelling language. In: 3ème Conférence Francophone de MOdélisation et de SIMulation, Vol. 1, Troyes, France, pp. 3–10.
- Wang, J., 1998. Timed Petri Nets, Theory and Application. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Williams, T., 1994. The Purdue enterprise reference architecture. *Computers in Industry*, pp. 141–158.
- Ye, X., 1994. Modélisation et simulation des systèmes de production: une approche orientée-objets. École Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne.
- Zelm, M., Vernadat, F., Kosandé, K., 1995. The CIMOSA business modelling process. *Computers in Industry* 21 (2).
- Zimmermann, A., 1994. A modeling method for flexible manufacturing systems based on colored Petri nets. In: *International Workshop on New Directions of Control and Manufacturing*, pp. 147–154.