



**HAL**  
open science

## Actes du 18ème Colloque national S.MART GIS S.MART

► **To cite this version:**

GIS S.MART. Actes du 18ème Colloque national S.MART. 18ème Colloque national S.MART, pp.1-332, 2023. hal-04643024

**HAL Id: hal-04643024**

**<https://hal.science/hal-04643024v1>**

Submitted on 25 Aug 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.



# Actes du 18ème Colloque national S.MART

4-6 avril 2023, Carry-le-Rouet

Sponsorisé par :



ModuleWorks



IMMERSION  
IMAGINATION, INTERACTION ...



SkyReal





## Editorial

Le Colloque national S.mart est un événement bi-annuel organisé par le Groupement d'Intérêt Scientifique GIS S.MART qui réunit chercheurs, enseignants et industriels français pour des échanges transdisciplinaires et intergénérationnels en matière de nouveaux développements scientifiques, technologiques et pédagogiques dans le domaine de l'industrie du futur.

Organisé conjointement par l'ENSAM d'Aix-en-Provence et l'Université de Toulon, établissements constituant le Pôle S.MART PACA, le 18ème Colloque S.MART s'est déroulé du 4 au 6 avril 2023 à Carry-le-Rouet avec l'ambition de rassembler les « Générations S.mart » autour des valeurs du GIS : collectif, partage et diversité.

Les thématiques scientifiques et techniques couvertes par le colloque sont les suivantes :

- Conception de produits et services
- Ecoconception & ACV
- RV & RA
- Tolérancement
- Chaîne numérique
- Procédés de fabrication avancés
- Machines et robots
- Ingénierie système
- Métrologie et précision
- Gestion et systèmes de production
- Maintenance du futur
- IA pour l'industrie du futur
- IoT pour l'industrie du futur
- Innovation pédagogique

Comptant 190 inscrits et 56 articles soumis, cette 18ème édition a été un réel succès. Quatre ateliers de travail, des séances plénières académiques et industrielles, ainsi que sept stands tenus par les sponsors industriels ont également été proposés aux participants pour favoriser les échanges.

Ces actes contiennent les articles acceptés lors du Colloque S.MART 2023 et dont la diffusion a été acceptée par les auteurs, soit 54 articles complets. Ces articles sont également disponibles individuellement dans une collection HAL dédiée : <https://hal.science/S-MART2023>



# Comité d'organisation

## Président

- CHALVIN Maxime, Université de Toulon

## Membres du comité d'organisation

- BOUET Laetitia, *GIS S-MART*
- CAMPOCASSO Sébastien, *Université de Toulon*
- CARGNINO Ludivine, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- CLAUDE Alexis, *Université de Toulon*
- GARAMBOIS Pierre, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- GOMAND Julien, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- HUET Florian, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- PERNOT Jean-Philippe, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- POLETTE Arnaud, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- ROUCOULES Lionel, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- SEILLIER Sabine, *Université de Toulon*
- TANIÈRE Thierry, *GIS S-MART*
- WANG Zhiping, *Université de Toulon*
- YAHIA Esmâ, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*



# Comité scientifique

## Président d'honneur

- ROUCOULES Lionel, *Arts et Métiers, Aix-en-Provence*

## Président

- CAMPOCASSO Sébastien, *Université de Toulon*

## Membres du comité scientifique

- ABISSET-CHAVANNE Emmanuelle, *Arts et Métiers Bordeaux*
- ALDANONDO Michel, *Mines Albi*
- ANWER Nabil, *Université Paris-Saclay*
- ARBELAEZ Giovanni, *Université de Strasbourg*
- ARROYAVE Santiago, *Aix-Marseille Université*
- AUBRY Alexis, *Université de Lorraine*
- BEAREE Richard, *Arts et Métiers Lille*
- BELKADI Farouk, *Ecole Centrale de Nantes*
- BERAUD Nicolas, *Université Grenoble Alpes*
- BOUJUT Jean-Francois, *Grenoble INP*
- BRIAND Cyril, *Université Toulouse III*
- BRICOGNE Matthieu, *Université de Technologie de Compiègne*
- BRISSAUD Daniel, *Grenoble INP*
- CAILLAUD Emmanuel, *Conservatoire National des Arts et Métiers*
- CARDIN Olivier, *Nantes Université*
- CHALVIN Maxime, *Université de Toulon*
- CHANAL Helene, *SIGMA Clermont*
- CHAVES-JACOB Julien, *Aix-Marseille Université*
- CHEUTET Vincent, *INSA Lyon*
- CHEVALLIER Gaël, *Université de Franche-Comté*
- COUTELLIER Daniel, *INSA Hauts-de-France*
- DA CUNHA Catherine, *Ecole Centrale de Nantes*
- DAIDIE Alain, *INSA Toulouse*
- DANTAN Jean-Yves, *Arts et Métiers Metz*
- DAVID Pierre, *Grenoble INP*
- DELAMEZIERE Arnaud, *GIP-InSIC*
- DEMOLY Frédéric, *Université de Technologie de Belfort-Montbéliard*
- DENEUX Dominique, *Université Polytechnique Hauts-de-France*
- DERIGENT William, *Université de Lorraine*
- DESSEIN Gilles, *ENI Tarbes*
- DUMONT Georges, *Ecole Normale Supérieure de Rennes*
- DURUPT Alexandre, *Université de Technologie de Compiègne*
- ETIENNE Alain, *Arts et Métiers Metz*

- EYNARD Benoit, *Université de Technologie de Compiègne*
- FISCHER Xavier, *ESTIA*
- GARDAN Nicolas, *MICADO*
- GERMAIN Guenael, *Arts et Métiers Angers*
- GOEPP Virginie, *INSA Starsbourg*
- GUERIN Jean-Dominique, *INSA Hauts-de-France*
- HOMRI Lazhar, *Arts et Métiers Metz*
- HOUSSIN Rémy, *Université de Strasbourg*
- HUET Florian, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- KERBRAT Olivier, *Ecole Normale Supérieure de Rennes*
- KLEMENT Nathalie, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- LAMOURI Samir, *Arts et Métiers Paris*
- LANDON Yann, *Université Toulouse III*
- LAROCHE Florent, *Ecole Centrale de Nantes*
- LAVERNHE Sylvain, *Université Paris-Saclay*
- LE DUIGOU Julien, *Université de Technologie de Compiègne*
- LEGARDEUR Jérémy, *ESTIA*
- LEVRAT Eric, *Université de Lorraine*
- LINARES Jean-Marc, *Aix Marseille Université*
- LOMBARD Muriel, *Université de Lorraine*
- MARANGE Pascale, *Université de Lorraine*
- MARCONNET Bertrand, *ECAM LaSalle*
- MEHDI-SOUZANI Charyar, *Université Sorbonne Paris-Nord*
- MERLO Christophe, *ESTIA*
- MILLET Dominique, *Université de Toulon*
- MUSEAU Matthieu, *Université Grenoble Alpes*
- NOEL Frédéric, *Grenoble INP*
- PAILHES Jérôme, *Arts et Métiers Bordeaux*
- PAREDES Manuel, *INSA Toulouse*
- PERNOT Jean-Philippe, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*
- PERRY Nicolas, *Arts et Métiers Bordeaux*
- PHILIPPOT Alexandre, *Université de Reims Champagne-Ardenne*
- PINQUIE Romain, *Grenoble INP*
- POURROY Franck, *Université Grenoble Alpes*
- QUINSAT Yann, *Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay*
- REMY Sébastien, *Université de Technologie de Troyes*
- RIERA Bernard, *Université de Reims Champagne-Ardenne*
- RIO Maud, *Université Grenoble Alpes*
- ROBIN Vincent, *Université de Bordeaux*
- TOLLENAERE Michel, *Grenoble INP*
- TOURNIER Christophe, *Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay*

- VAREILLES Elise, *ISAE SUPAERO*
- VIGNAT Frederic, *Grenoble INP*
- VILLENEUVE François, *Université Grenoble Alpes*
- VIPREY Fabien, *Arts et Métiers Cluny*
- WOLFF Valéry, *Université Lyon 1*
- YAHIA Esma, *Arts et Métiers Aix-en-Provence*



# SOMMAIRE

<b>Sommaire</b>	<b>11</b>
<b>Articles de synthèse de projets collaboratifs</b>	<b>15</b>
<b>Projets de recherche</b>	<b>17</b>
▷ Projet RegEcoS : Un EcoSystème de Régénération de produits basé sur leurs usages . . . . .	17
▷ Projet SOFIA : Stratégies de pilotage à grande vitesse en fusion laser sur lit de poudre dans le cadre du projet . . . . .	21
▷ Projet D-TechnoSS : Design Technology for Strong Sustainability . . . . .	25
<b>Projets d'innovation pédagogique</b>	<b>29</b>
▷ Projet ET-LIOS : Bilan du projet PIA Hybridation : accroître les opportunités de dissémination des résultats . . . . .	29
<b>Articles de recherche et d'innovation pédagogique</b>	<b>35</b>
<b>Soutenabilité pour une industrie au service de la société</b>	<b>37</b>
▷ Introduire les enjeux de soutenabilité dans les organisations via le Management par la Valeur . . . . .	37
▷ Freins et opportunités à la réparation dans les repair cafés : pour une transition vers des produits plus responsables . . . . .	43
▷ Sensibilisation à la soutenabilité forte en conception : une expérience pédagogique . . . . .	49
▷ Accompagner une structure territoriale dans sa transition vers la durabilité, proposition d'une architecture méthodologique . . . . .	53
▷ Cartographie des projets d'économie circulaire : étude de cas dans une entreprise de l'industrie sportive . . . . .	57
▷ Low Tech et Communs : quel positionnement et quels enjeux pour les futurs systèmes de production . . . . .	63
<b>Le multi-agents pour les services de demain</b>	<b>69</b>
▷ Modélisation de la logistique interne d'une usine automobile comme un système multi-agents . . . . .	69

▷ Un cadre basé sur les scénarios du futur au service de la simulation multi-agents de la mobilité urbaine de demain . . . . .	75
<b>Technologies 4.0 pour les systèmes de production</b>	<b>81</b>
▷ Comment favoriser la transition vers l'industrie 4.0 dans le secteur textile-habillement : étude de cas du déploiement d'un cobot au sein de l'entreprise Petit Bateau	81
▷ Acceptation d'un gant d'assistance aux gestes de la main . . . . .	87
▷ Technologies de l'industrie 4.0 applicables à la chasse aux gaspillages du lean manufacturing . . . . .	93
<b>Compréhension et amélioration des systèmes via l'IA et l'optimisation</b>	<b>99</b>
▷ Etude comparative des méthodes de création des modèles de transformation	99
▷ Vers un guide de bonnes pratiques pour l'optimisation d'éolienne à axe horizontal	105
▷ Impact de méthodes d'analyse de données pour améliorer le pronostic de dé- faillance moteur à partir de séries temporelles multivariées . . . . .	111
▷ Développement d'un protocole de comparaison d'algorithmes d'apprentissage par renforcement pour la gestion optimale temps-réel de flux de puissance dans un micro-réseau électrique . . . . .	117
<b>Caractérisation et modélisation des machines et robots</b>	<b>123</b>
▷ Nouvelle méthodologie in situ pour la caractérisation des erreurs géométriques d'axe de rotation sur une machine-outil multi-axes . . . . .	123
▷ Identification paramétrique pour un modèle de comportement dynamique d'une machine de forge . . . . .	129
▷ Estimation de la couverture de configurations de numérisation 3D à l'aide de techniques d'apprentissage machine . . . . .	135
<b>Ingénierie des systèmes, éco-conception et ACV</b>	<b>141</b>
▷ Evaluation multicritère du cycle de vie dans une perspective de développement durable : Cas de l'huile d'olive . . . . .	141
▷ Proposition d'une méthodologie de conception collaborative de logiciel d'écocon- ception Cas de la filière voile de compétition en Bretagne . . . . .	147
▷ Une méthode, un langage et un environnement pour la modélisation et la résolution de problème de conception de système . . . . .	153
▷ Industrie du Futur et santé-sécurité : l'Ingénierie Système apporte-elle une ré- ponse? . . . . .	157
▷ Réutilisation de modèles en ingénierie système et écoconception . . . . .	163

▷ Penser la gestion d'actifs dès la conception - Cas du matériel roulant ferroviaire	169
<b>Réalité Virtuelle et Augmentée en support de la formation et de l'industrie</b>	<b>175</b>
▷ Réalité Augmentée en enseignement des Sciences pour l'Ingénieur : Application au réglage des systèmes de production	175
▷ Scénario pédagogique pour des opérations d'assemblage assistées par la Réalité Augmentée	181
▷ Utilisation de la Réalité Augmentée pour l'enseignement de gestes de kinésithérapie	187
▷ Le patrimoine industriel en virtuel comme outil de formation	193
▷ Serrage 4.0 : Réalité augmentée et outils connectés pour une fiabilisation du procédé d'assemblage	199
▷ Développement de Jumeau Numérique pour la Formation au sein du pôle S.mart RAO	205
<b>Procédés de fabrication avancés : caractérisation, modélisation, contrôle</b>	<b>211</b>
▷ Mesure de température du bain fondu en fabrication additive avec une caméra RGB	211
▷ 3D residual stress modeling in turning of AISI 4140 steel	217
▷ Une nouvelle méthode pour dépoudrer des pièces issues du procédé de fusion par faisceau d'électrons	219
▷ Caractérisation d'un poste de soudure Cold Métal Transfer pour le pilotage du procédé Wire Arc Additive Manufacturing	225
▷ Approche phénoménologique du contrôle de la géométrie de cordons en WAAM	231
▷ Automatisation du processus de réparation de défauts de pièces de moulage en acier par soudage	237
<b>Usages des Jumeaux Numériques et aide à la décision</b>	<b>243</b>
▷ Jumeau Numérique de systèmes de production : la synchronisation modèle virtuel / système réel en pratique	243
▷ Modèle à base d'intervalle pour la quantification de l'incertitude de la consommation d'énergie dans un jumeau numérique	249
▷ Détection automatique de contraintes cinématiques d'assemblages de modèles CAO	255

▷ Amélioration de la soutenabilité de la fin de vie des produits industriels en utilisant un système d'aide à la décision basé sur le jumeau numérique et la gestion des connaissances . . . . .	261
▷ Méthode d'évaluation en deux étapes d'un outil d'aide à la décision en fabrication additive . . . . .	267
<b>Conception et analyse pour la fabrication additive</b>	<b>273</b>
▷ Evaluation des types d'informations et des supports de transmission pour favoriser l'assimilation de connaissances liées à la fabrication additive . . . . .	273
▷ Conception des surfaces minimales triplement périodiques à densité variable pour la fabrication additive . . . . .	279
▷ Conception pour l'impression 4D multi-matériaux : Développement d'un algorithme pour la génération d'assemblages de blocs interlockés . . . . .	285
▷ Stratégie d'analyse multi-échelle pré-fabrication additive pour valider la fabrication . . . . .	291
<b>Modélisation mécanique pour l'analyse des systèmes</b>	<b>297</b>
▷ Modèle analytique amélioré pour les ressorts de compression cylindriques meulés en prenant en compte le défaut de parallélisme de leurs surfaces d'appui .	297
▷ Modélisation et caractérisation des structures hybrides bois/aluminium pour une utilisation future comme glissières de sécurité de ponts routiers . . . . .	303
▷ Suivi dynamique de la courbure de la colonne vertébrale : cas de la détection de la scoliose . . . . .	309
<b>Nouvelles approches pédagogiques pour l'industrie du futur</b>	<b>315</b>
▷ TELMA : plateformes pédagogiques innovantes en réseau de e-maintenance	315
▷ MÉMOTVIT' : L'apprentissage d'un champ lexical métier par les cartes : retours d'expériences . . . . .	321
▷ Conception de séquences pédagogiques immersives en Lean Manufacturing : proposition de méthode et retour d'expérience . . . . .	327

# **Articles de synthèse de projets collaboratifs**



# RegEcoS : Un EcoSystème de Régénération de produits basé sur leurs usages

P. Marangé <sup>a,\*</sup>, H. Ben Rejeb <sup>b</sup>, V. Robin <sup>c</sup> M. Traore <sup>c</sup>, P. Zwolinski <sup>b</sup>, E. Levrat <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Université de Lorraine, CRAN, UMR 7039, Campus Sciences, BP 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>b</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 46 Avenue Félix Viallet, Grenoble, 38000, France

<sup>c</sup> Université de Bordeaux, Laboratoire IMS – UMR 5218, 351 Cours de la Libération 33405 Talence – Cedex

## 1. INTRODUCTION

Le projet RegEcoS vise la mise en œuvre de l'économie circulaire en se focalisant sur la revalorisation des produits à la fin de leur première phase d'utilisation, ceci afin de limiter la consommation d'énergie et de matières premières. Cette approche impose de concevoir conjointement un produit et son écosystème industriel et informationnel pour le rendre plus robuste, durable, réparable, et d'envisager plusieurs vies pour lui ou ses composants.

Dans ce contexte, les trois laboratoires : CRAN, G-SCOP et IMS ont monté un projet soutenu par S.mart en 2020, puis une ANR qui a débuté en janvier 2023. Ce programme vise le développement de méthodes, modèles et outils pour l'industrialisation de la régénération des produits en fin d'utilisation. Toutes les possibilités permettant de revaloriser un produit après son utilisation et ainsi repousser sa fin de vie (reuse, remanufacturing, recycling, etc.), sont regroupées sous le terme de régénération. La régénération impose une vision globale et intégrée de la revalorisation (en opposition à une vision classique très segmentée et locale), transversale au cycle de vie du produit, puisqu'elle peut être envisagée plusieurs fois dans la vie d'un même produit et de tout ou partie de ses sous-ensembles, composants.

La régénération ne peut être abordée comme un processus de production classique, du fait :

- de la spécificité du flux de produits traités (déchets, flux non constants en quantité et qualité),
- des informations disponibles pour prendre la décision (natures hétérogènes, incomplètes, incertaines, ...)
- de l'effet escompté de la régénération, dépendant de l'état de santé du produit à la fin de son utilisation et de la demande du marché.

De plus, pour envisager plusieurs phases de régénération dans la vie d'un produit, celui-ci doit présenter des aptitudes à la régénération et doit être

conçu pour la régénération (Design for Regeneration). D'autre part, le processus de régénération qui interviendra, plus tard et à plusieurs reprises dans la vie d'un produit, doit être adapté, dimensionné selon les spécificités du produit et des besoins du marché.

Dans cet article, nous proposons de tracer l'évolution de cette collaboration puis de donner les pistes de recherche abordées dans le cadre de l'ANR RegEcos. L'article sera structuré en 3 parties : (i) une description du projet S.mart de 2020 et des résultats obtenus, (ii) une description de l'ANR RegEcos, (iii) conclusions et perspectives.

## 2. DESCRIPTION PROJET S.MART 2020

Dans le cadre de ce projet, nous cherchions à aider les régénérateurs/producteurs à définir le processus de régénération et plus spécifiquement les alternatives possibles de régénération à mettre en place en fonction de l'état de santé de leurs produits-déchets. Pour cela nous cherchions à répondre à plusieurs questions :

- Quels sont les critères pour spécifier l'état de santé d'un produit-déchet en vue de sa régénération ?
- Quelles sont les informations utiles à récupérer au cours des différentes phases de vie du produit à régénérer ?
- Comment établir l'état de santé du produit à partir de l'état de santé des sous-ensembles ou des composants ?
- Comment mettre en place une coopération entre les différentes parties prenantes de l'écosystème pour collecter ces informations ?
- Quelles parties prenantes détiennent l'information ? et quelles sont les informations nécessitant d'être partagées ?
- Comment faire coopérer les parties prenantes ?

Afin de répondre aux questions identifiées, le projet a été découpé en trois lots (workpackages) :

*WP1 : Identification des informations utiles à la génération de l'état de santé :* Lors de la phase de conception d'un produit, l'usage et la régénération sont pris en compte. Pour que le produit neuf réponde aux besoins clients, il y a des exigences à satisfaire et si nous souhaitons que les produits régénérés puissent être réutilisés, il faut que certaines exigences soient toujours satisfaites. Si ce n'est pas le cas, la régénération à mettre en place doit être choisie en fonction de l'état de santé du produit-déchet. L'objectif de ce workpackage était d'identifier les informations à surveiller et à analyser pour vérifier la satisfaction des exigences.

*WP2 : Identification des parties prenantes pouvant remonter l'information et formalisation de la coopération entre elles :* Une fois que les informations sont identifiées pour établir l'état de santé, les parties prenantes peuvent les capter, les observer, les enregistrer et les faire remonter pour alimenter les décisions de régénération. Ici, il s'agit de définir une bonne coopération entre les parties prenantes, c'est-à-dire qu'il faut spécifier les informations à échanger afin qu'en fin de vie du produit, il soit possible d'établir plus précisément son état de santé en prenant en compte l'usage qui en a été fait.

*WP3 : Identification et quantification/qualification l'état de santé des produits déchets :* La définition d'une solution de régénération va s'appuyer sur l'état de santé de produits-déchets. Il s'agit de définir les éléments de l'état de santé de produits-déchets, composés de différents sous-ensembles et composants, ayant chacun un état de santé propre. Pour répondre à ce point, il est nécessaire de déterminer les critères spécifiant l'état de santé, les interactions existantes entre eux, ce qui peut se faire par des opérateurs d'agrégation multicritère par exemple.

Ce projet a été réalisé à l'aide du financement de 2 stages de master recherche et d'un stage d'ingénieur. Les résultats que nous avons obtenus :

- Une revue de la littérature afin de caractériser la notion d'état de santé. Une étude bibliographique systématique a été réalisée grâce à la méthode PRISMA [5]. Elle a permis de déterminer les différentes approches existantes pour la détection, le diagnostic et le pronostic des défaillances des systèmes complexes. Elle a aussi permis de montrer les différents résultats obtenus pour des systèmes spécifiques ou des domaines d'application, ainsi que les approches courantes pour améliorer la fiabilité des systèmes en utilisant l'analyse de l'état de santé [11].
- Développement d'un cadre général pour l'estimation des états de santé et des scénarios circulaire : L'objectif de ce cadre est de permettre l'estimation de l'état de santé d'un système complexe afin d'optimiser les scénarios de fin de vie de ses composants, ce qui consiste à déterminer le scénario circulaire qu'ils devraient suivre [11]. Le cadre général proposé par le travail de master est basé sur les méthodes CBM

(Condition Based Maintenance) et PHM (Prognostic Health Management). L'approche PHM a été choisie parce qu'elle intègre les principes de la CBM, et qu'elle est recommandée pour la prédiction de la durée de vie restante des produits à l'aide de l'évaluation de la santé. La méthode CBM comporte plusieurs étapes qui commencent par la sélection de variables pertinentes liées à chaque composant. Ensuite, sur la base des données de fonctionnement, un indicateur de santé est caractérisé, ce qui permet de suivre et de modéliser la dégradation du composant. Ceci permet de déterminer les composants les plus critiques du système. L'état de santé peut être estimé par différentes approches de modélisation grâce à la méthode PHM [6]. L'application de CBM et PHM est suivie par l'étape de prise de décision sur les scénarios circulaires du produit en fin de vie.

- Les prises de décision de régénération tout au long du cycle de vie d'un produit obligent d'avoir un grand nombre de données fiables aux formats et origines divers sur l'ensemble du cycle et donc d'être en mesure de les collecter, visualiser, manipuler et exploiter [1]. L'objectif des travaux de master était d'estimer la faisabilité de la prise en compte d'une telle complexité, en considérant tous les niveaux d'évolution d'un produit ainsi que l'ensemble des différentes parties prenantes tout au long du cycle de vie [1][10]. Une cartographie des parties prenantes et des typologies de données potentiellement générées au cours du cycle ont été proposées. Nous avons ensuite étudié les modèles et outils susceptibles de supporter la collecte, le suivi et l'exploitation de ces données. Nous avons retenu le concept de « jumeaux numériques » [3][7] qui sont des représentations virtuelles des produits, des processus ou des systèmes physiques, car ils participent de la meilleure compréhension, offre une capacité d'anticipation accrue du comportement des systèmes [2] et la possibilité d'intégrer des facteurs sociaux et environnementaux du système technique [4].
- Développement d'un système d'aide à décision qui permet d'évaluer les différentes stratégies de régénération en fonction de l'état de santé du produit d'un point de vue de la probabilité de réussite de celle-ci. En effet en fonction de l'état de santé du produit, il est possible qu'une action de régénération n'ait pas l'effet escompté. Par exemple, lors d'un désassemblage d'un carter en plastique, si le plastique a été exposé au soleil, il y a un risque au désassemblage de casser une interface. Nous avons donc choisi de modéliser les différentes stratégies de régénération par un réseau de Petri stochastique, ce qui permet d'introduire des incertitudes sur l'exécution des différentes actions. Pour que ces incertitudes tiennent compte de l'état de santé du produit, nous avons utilisé des jetons de couleurs dans le réseau de Petri coloré stochastique. Afin d'évaluer la probabilité de réussite d'une stratégie de régénération, nous avons effectué une simulation de Monte-Carlo [8,9].

- Conception d'un système d'information pour un processus de régénération. A partir de l'analyse de flux de produits dans un système de régénération l'ensemble, nous avons pu déterminer les données que nous devons prendre en compte sur le procédé de régénération, sur le produit et sur l'usage de celui. Ce travail a été réalisé par un stagiaire de 2<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur et a conduit à un diagramme de classe représentant l'ensemble des informations.

A la fin de ce projet financé par le réseau S.mart, nous avons pu formaliser de nouveaux axes de recherche et nous avons alors déposé un projet ANR en 2022, le projet ANR RegEcoS, qui a débuté en janvier 2023.

### 3. LES OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES DU PROJET ANR REGECOS ET SA STRUCTURATION

Le projet RegEcoS a pour objectif de choisir la solution de régénération d'un produit, en répondant aux difficultés de la prise de décision de la régénération à mettre en place, qui résident (i) dans la méconnaissance de la vie du produit lors de la phase d'utilisation et (ii) dans le fait que le produit et les processus de régénération sont conçus séparément. Les originalités de ce projet sont d'adopter cette vision globale et transverse de la conception des produits et des processus de régénération et de s'appuyer sur plusieurs jumeaux numériques permettant ainsi (i) d'avoir la vue des processus de régénération et (ii) d'avoir une observation/prédiction de l'utilisation du produit et l'impact sur son état de santé. Afin de prendre en compte les besoins des industriels, nous avons intégré le partenaire Décathlon, qui cherche actuellement à mettre en place des dispositifs pour la régénération des équipements sportifs en fin d'utilisation, afin de répondre à la loi AGECE de février 2020. Une autre originalité forte est la mise en œuvre des propositions scientifiques sur deux cas d'application, un démonstrateur académique (ProGreSS 4.0) et sur un problème industriel. Ces deux cas d'étude viendront alimenter en amont la réflexion sur les approches proposées et l'applicabilité de celles-ci. Le projet RegEcoS a pour ambition de lever trois verrous scientifiques majeurs :

- (Verrou 1) Nécessité d'intégrer tous les paramètres de l'écosystème des produits dès leur conception conjointement au processus de régénération, pour favoriser la mise en œuvre des meilleures alternatives de régénération possibles tout au long de la vie du produit,
- (Verrou 2) Manque d'une approche d'aide à la décision de la stratégie de régénération basée sur des sources

d'informations hétérogènes, incomplètes et incertaines, provenant de phases de vie différentes et de différents processus,

- (Verrou 3) Nécessité de remonter, capitaliser de l'information sur l'ensemble des phases de vie d'un produit et en particulier son utilisation (conditions opérationnelles, contraintes, etc.) pour pouvoir anticiper ses usages ultérieurs. Face à ces verrous, le projet RegEcoS a pour objectif de proposer une méthodologie pour la conception intégrée d'un produit et de son écosystème de régénération. L'écosystème de régénération regroupe les supports au suivi de l'usage d'un produit durant son utilisation (système d'information, jumeau numérique...), et les méthodes pour aider lors de la prise de décision de régénération, en vue de prolonger la durée de vie du produit.

L'originalité scientifique de ce projet réside dans l'investigation simultanée et intégrée de plusieurs pistes de recherche telles que :

- La conception intégrée produit/écosystème de régénération pour identifier les paramètres clés à mesurer au niveau de l'écosystème, pour l'aide à la décision sur la stratégie de régénération. Cette orientation apporte une réponse au verrou 1 en proposant une approche de conception conjointe produit-processus.
- Le jumeau numérique du produit et des processus pour adapter la prise de décision de régénération aux usages d'un produit et aux évolutions du processus de régénération. Cette orientation aborde le verrou 3 pour limiter la myopie sur l'état de santé effectif du produit lors de l'utilisation et pour adapter le système d'aide à la décision au système de régénération.
- L'aide à la décision de régénération à appliquer en fonction des paramètres du produit, des processus et des potentielles régénérations du produit. Cet axe apporte des éléments de réponse au verrou 2 en proposant des travaux autour de la définition de l'état de santé du produit exploitant les sources d'information disponibles, une approche d'aide à la décision globale tenant compte de plusieurs cycles de vie du produit, de l'incertitude sur certaines informations du produit et sur l'efficacité des actions de régénération.

Afin d'apporter des réponses aux verrous identifiés, le projet RegEcoS est structuré en 5 lots (Figure 1).

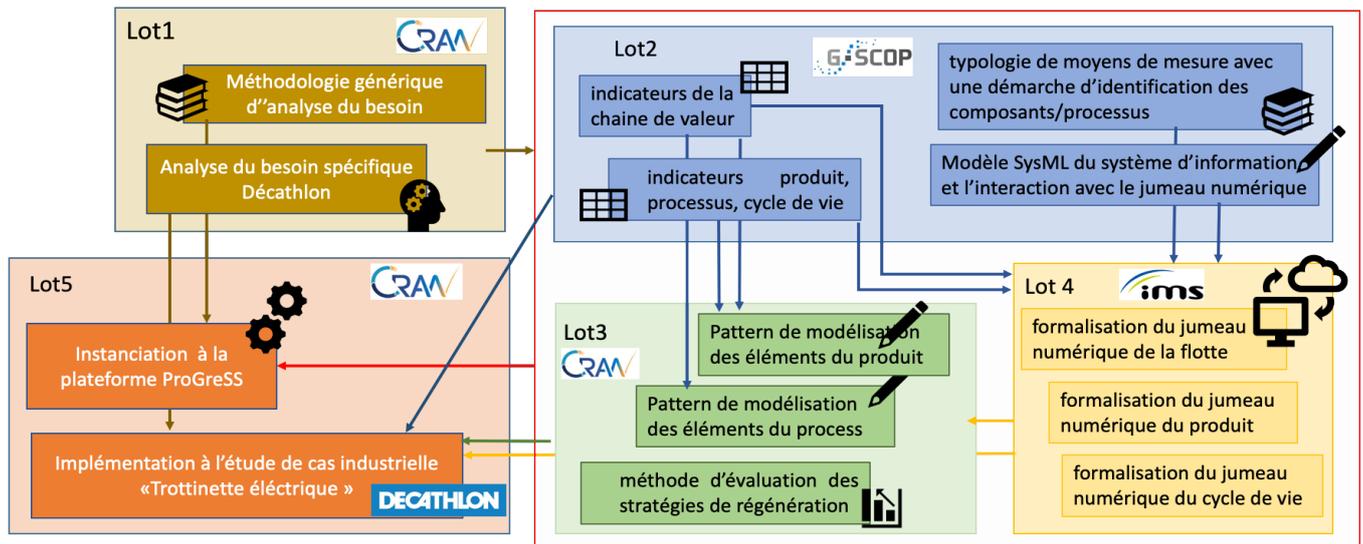


Figure 1 – Structuration et activités principales des 5 lots du projet RegEcoS

#### 4. CONCLUSION

La transition vers une société plus économe en ressources est un objectif central en Europe et les systèmes industriels doivent faire face aux principaux défis de l'Industrie du Futur : la rareté des ressources, l'efficacité énergétique, la décarbonation, les attentes en matière de personnalisation, etc.

Les scénarios industriels associés à la régénération des produits constituent des pistes de solutions pouvant contribuer à répondre à ces enjeux. Pour cela, ils doivent se développer et s'ancrer dans les pratiques industrielles et des consommateurs, pour répondre à la fois aux exigences de disponibilité de ressources et de limitation des impacts environnementaux. L'Europe au travers de sa feuille de route sur l'économie circulaire et Green Deal, des associations telles que la fondation Ellen MacArthur ou des fédérations telles que Rcube en France, permettent la mise en lumière des scénarios d'économie circulaire. Il reste néanmoins un travail non négligeable à mener pour implémenter ces scénarios dans l'industrie et assurer une réelle transition des systèmes industriels vers la circularité.

Le projet ANR RegEcos vise donc à développer et faire connaître les méthodes et outils pouvant supporter l'implémentation de scénarios de régénération. Pour ce faire nous travaillerons sur la définition d'une démarche de mise en place d'un jumeau numérique de chaîne de valeur circulaire pour permettre l'optimisation de son pilotage en intégrant le point de vue environnemental.

#### REMERCIEMENTS

Les trois laboratoires remercient le réseau S.mart pour le soutien lors du projet S.mart 2020, ce qui permis de lancer le projet ANR RegEcos, et notre nouveau partenaire industriel Décathlon pour les perspectives

d'expérimentation et de collaboration durant le projet RegEcos.

#### REFERENCES

- [1] Acerbi F.; Sassanelli C.; Terzi S.; Taisch M., 2021. A Systematic Literature Review on Data and Information Required for Circular Manufacturing Strategies Adoption. Sustainability, 13, 2047. <https://doi.org/10.3390/su13042047..>
- [2] Grieves M., Vickers J., 2016. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in Trans-Disciplinary Perspectives on System Complexity, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, Editors., Springer: Switzerland. p. 85-114.
- [3] Grieves M., 2005. Product Lifecycle Management: the new paradigm for enterprises. Int. J. Product Development, 2 (Nos. 1/2), 71-84.
- [4] Lee S., Jain S.; Zhang, Y., Liu, J., et Son, Y.J. A Multi-Paradigm Simulation for the Implementation of Digital Twins in Surveillance Applications. In Proceedings of the 2020 IISE Annual Conference, New Orleans, LA, USA, 30 May–2 June 2
- [5] Moher D., Liberati A., Tetzlaff J., and Altman D. G., "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement," doi: 10.1136/bmj.b2535
- [6] Pecht M. (2009). Prognostics and Health Management of Electronics. In Encyclopedia of Structural Health Monitoring (eds C. Boller, F.-K. Chang and Y. Fujino). <https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm118>
- [7] Traoré M.K. 2021. Unifying Digital Twin Framework: Simulation-Based Proof-of-Concept. In Proceedings of the 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing–June 7-9, Budapest, Hungary.
- [8] Vanson G., Marangé P., Levrat E., End-of-life decision making in circular economy using generalized colored stochastic Petri nets. Autonomous Intelligent Systems, 2022, 2 (1), pp.3.
- [9] Vanson G., Marangé P., Levrat E., Product and process assessment of end-of-life product using generalized colored stochastic Petri nets. 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM 2021, Jun 2021, Budapest (virtual), Hungary. pp.677-682,
- [10] Vila C., Abellán-Nebot, J.V., Albiñana, J.V, Hernández, G., 2015. An Approach to Sustainable Product Lifecycle Management (Green PLM), Procedia Engineering, Volume 132, Pages 585-592.
- [11] Wandji C., Ben Rejeb H., Zwolinski P. (2022), Characterization of the state of health of a complex system at the end of use. Procedia CIRP;105:49-54.

# Stratégies de pilotage à grande vitesse en fusion laser sur lit de poudre dans le cadre du projet SOFIA

C. Tournier \*, K. Ettaieb, K. Godineau, S. Lavernhe, Y. Quinsat

Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190 Gif-sur-Yvette, France

\* e-mail : christophe.tournier@ens-paris-saclay.fr

## 1. INTRODUCTION

Le projet SOFIA (**S**olutions pour la **F**abrication Industrielle **A**dditive métallique [www.sofia-3d.fr](http://www.sofia-3d.fr)) est un programme de recherche appliquée d'une durée de 6 ans (2016-2022). SOFIA a pour objectif d'améliorer les performances et la robustesse de la fabrication additive métallique sur lit de poudre, couvrant toute la chaîne de valeur, de l'élaboration des poudres à la fabrication des pièces finies en passant par le développement et l'exploitation des machines. Le consortium SOFIA est composé d'acteurs français majeurs dont 7 industriels et 9 laboratoires académiques. Doté d'un budget de plus de 50 M€, SOFIA est un PSPC (Projets de recherche et développement Structurants Pour la Compétitivité) soutenu financièrement par Bpifrance et par la région Auvergne-Rhône-Alpes. Le projet est labellisé par plusieurs pôles de compétitivité dont ViaMéca, Aerospace Valley, ASTech Paris Région, NAE et Mov'eo. Il vise ainsi au développement de briques technologiques permettant la fabrication de pièces robustes et de façon compétitive, en particulier pour répondre aux exigences de l'industrie aéronautique. Les travaux portent sur 4 axes principaux :

- Les poudres et matériaux métalliques
- L'amélioration de la performance et de la robustesse des machines
- Le développement d'outils numériques
- L'élargissement de la connaissance des risques HSE

Parmi les 7 lots du projet, nous nous focalisons dans cet article sur le lot n°2 et plus particulièrement sur la tâche 2.6 portant sur le développement de stratégies de pilotage à grande vitesse. En effet, les procédés de fabrication additive métallique et le procédé PBF-LB/M en particulier ont ceci de singulier qu'ils permettent de créer la géométrie et le matériau de la pièce en même temps. Le contrôle de la trajectoire de balayage laser et des paramètres du procédé est donc essentiel, c'est-à-dire

le contrôle de la position du spot laser dans le plan de travail et de la quantité d'énergie transférée à la matière. Aussi, parmi les tâches traitées nous avons choisi de présenter ici les travaux et résultats relatifs aux trois tâches suivantes :

1. Calibration optimale des chaînes optiques in-situ
2. Interpolation optimale des trajectoires par la CN
3. Génération des trajectoires

Ces trois tâches font partie de la chaîne numérique proposée sur la Figure 1 qui montre le besoin de disposer d'un jumeau numérique du moyen et du procédé s'appuyant sur des modèles afin de simuler la fabrication dans les phases amont pour améliorer et garantir la qualité interne et externe des pièces produites.

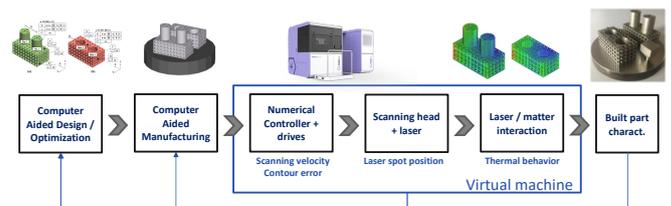


Figure 1 - Chaîne numérique

## 2. CALIBRATION OPTIMALE DES CHAINES OPTIQUES

Dans une machine PBF-LB/M, le système principal qui positionne le spot laser et distribue l'énergie sur le lit de poudre est la chaîne opto-mécanique et en particulier la tête de scanning (Figure 2). La calibration de ces systèmes est un processus itératif et long, n'intégrant que peu de modèles physiques. La relation entre la position du spot laser dans le plan de travail et la position des actionneurs, ici des galvanomètres, est obtenue par interpolation de tables de correspondance déterminées expérimentalement. En effet, la fréquence de pilotage des actionneurs à 100 kHz ne permet pas de calculer la transformation géométrique inverse en temps réel.

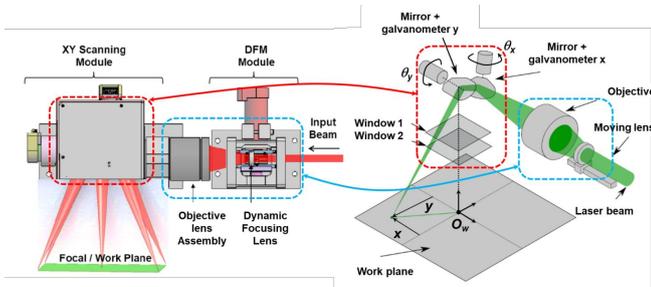


Figure 2 – Tête de scanning [1, 2]

Afin d'éviter les itérations successives de tirs laser pour raffiner ces tables de correspondance dans la phase d'étalonnage de chaque machine, un modèle géométrique a été développé s'appuyant sur 14 paramètres géométriques, 2 paramètres optiques et 30 défauts d'assemblage de la chaîne opto-mécanique [1, 2].

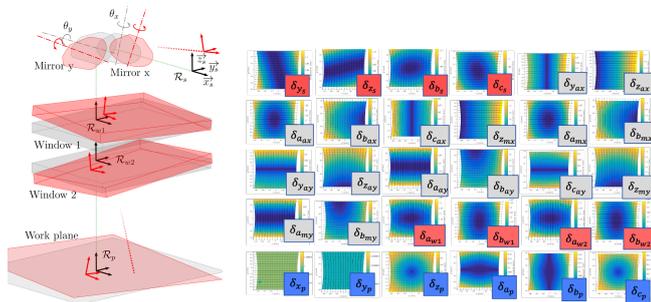


Figure 3 – Modèle géométrique avec défauts et base de défauts

Ce modèle est utilisé dans un processus d'identification des défauts pour obtenir une machine virtuelle représentative du système réel dont les étapes principales sont :

- Création d'une base de défauts (Figure 3)
- Calcul de l'écart entre position de consigne et mesure
- Obtention des valeurs des défauts par projection des écarts sur la base

Le modèle géométrique avec défauts ainsi développé est utilisé pour quantifier l'impact des défauts d'assemblage sur la position du spot laser, les compenser en les intégrant dans les tables de correspondance (Figure 4) et réduire le temps de calibration d'une machine de fabrication additive. Ainsi la méthode développée au LURPA et exploitée par AddUp permet de passer de deux jours de travail à une demi-journée pour assurer l'étalonnage.

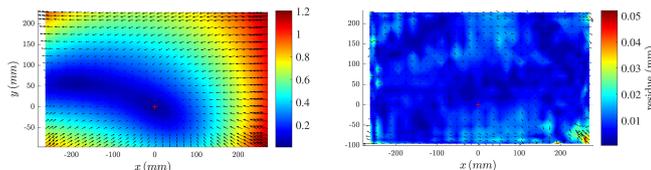


Figure 4 – Résidus entre les points mesurés et les modèles : nominal sans défaut (gauche), identifié avec défauts (droite)

L'inconvénient de cette approche est la méthode expérimentale pour générer et acquérir la position de points réels. Celle-ci s'appuie sur le gravage d'une plaque brunie dans la machine et la mesure de la position des

motifs à l'extérieur de la machine. Aussi les travaux développés dans [3] ont porté sur le développement d'une méthode de calibration in-situ des machines PBF-LB/M par vision au moyen d'une caméra haute résolution monochrome. Les étapes principales sont les suivantes :

- Calibration de la caméra et calcul de l'homographie à partir de quatre points appartenant au plateau
- Mesure d'environ 200 positions du spot laser par l'identification des coordonnées en pixel du centre spot dans l'image corrigée
- Identification du modèle géométrique avec défaut de la machine et calcul des tables de correspondance

Les résultats obtenus montrent que la méthode de mesure développée est appropriée pour la mesure in-situ avec une bonne exactitude. Après le processus de calibrage, les erreurs entre les positions générées par la machine identifiée et celles mesurées sont très faibles avec une erreur moyenne de 0,03 mm, et environ 80 % des positions présentent une erreur inférieure à 0,04 mm dans la zone de travail (Figure 5).

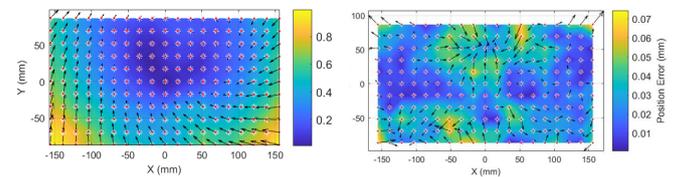


Figure 5 – Écarts absolus entre les points mesurés et prédits sans et avec défauts identifiés

### 3. INTERPOLATION OPTIMALE DES TRAJECTOIRES

En PBF\_LB/M, la trajectoire effective du spot laser est rarement étudiée par rapport aux travaux sur le choix de la stratégie de balayage et de ses paramètres. Or, la trajectoire programmée en FAO est modifiée par la commande numérique (CN) de la machine afin de générer des consignes admissibles pour les actionneurs (galvanomètres). Cette modification génère localement des déviations sur la trajectoire et une diminution significative de la vitesse du spot laser [2, 4]. Afin d'identifier le comportement de la CN, un banc de test reproduisant une machine industrielle a été développé. Il permet d'acquérir les consignes envoyées aux actionneurs et leurs positions réelles à une fréquence de 100 kHz, ainsi que l'énergie déposée par le spot laser dans le plan de travail.

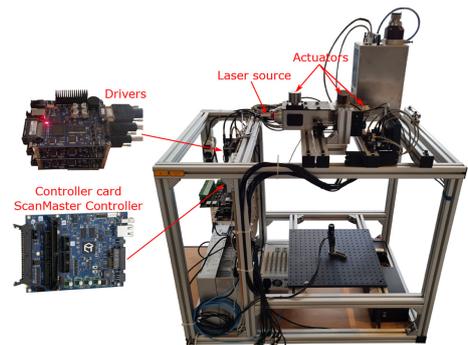


Figure 6 – Banc d'essai du couple CN / Tête de scanning

L'analyse de ces données montre que le traitement effectué par la CN est basé sur un filtrage numérique avec des filtres à réponse impulsionnelle finie. Tels qu'implémentés, ces filtres sont constants quelle que soit la condition de fabrication et génèrent alors des chutes de vitesse et une grande erreur de contour : plus de 100  $\mu\text{m}$  à 2 m/s. Nous avons donc proposé différents types de filtres parmi lesquels les filtres adaptatifs en fonction de la trajectoire à exécuter et les filtres en chapeau pour répartir l'erreur de contour de part et d'autre de la trajectoire programmée.

## 4. GENERATION DES TRAJECTOIRES

### 4.1. Simulation thermique

La trajectoire de scanning ayant une influence majeure sur le comportement thermomécanique des pièces pendant la fabrication, nous avons proposé un modèle thermique tridimensionnel, de forme analytique et explicite, à l'échelle méso, permettant une évaluation efficace de l'effet de la trajectoire [5, 6]. La méthode « Flash » consiste à cumuler les effets locaux de conduction thermique du laser dans le matériau fusionné (Figure 8) afin de calculer la distribution du champ de température dans toute la couche à chaque pas de temps. Le modèle a été calibré et validé par comparaison avec les résultats thermiques obtenus par un logiciel EF ainsi que par des mesures expérimentales dans le cas du matériau Ti6Al4V. La mise en œuvre d'un tel modèle permet de contenir les temps de calcul et espace mémoire nécessaires pour simuler des pièces de taille industrielle et analyser l'effet des trajectoires et paramètres procédé (Figure 9). Les résultats de simulation soulignent l'influence des trajectoires de lasage sur le champ de température et la répartition des gradients thermiques au cours de la fabrication d'une couche. La connaissance du champ de température local et la forme explicite du modèle thermique permettent par la suite d'améliorer le pilotage du procédé, notamment par la mise en œuvre d'une modulation locale de la puissance laser.

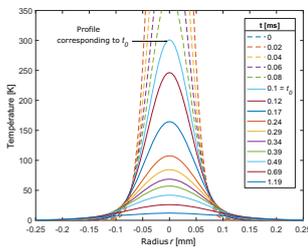


Figure 8 – Profils de température de surface simulés pour un flash

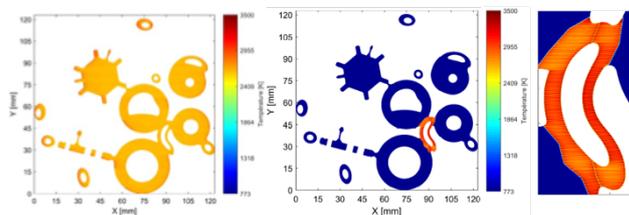


Figure 9 – Simulation thermique d'une couche complète (7 h, 32 Mo, 40 CPU) ; Simulation locale (10 min, 1 Mo, 40 CPU)

### 4.2. Trajectoires à modulation de puissance

L'optimisation et le contrôle des paramètres du procédé sont obligatoires pour améliorer la qualité des pièces produites. Pendant la fabrication, les paramètres du procédé sont généralement constants, quelle que soit la taille de la pièce ou de la couche construite. Le processus de fabrication peut ainsi conduire à un comportement thermique inhomogène et à des zones de surchauffe locales, affectant la qualité de la pièce. La méthode « Flash » a donc été exploitée pour moduler la puissance du laser en amont de la fabrication [6, 7]. L'approche suit deux étapes :

- Calcul de la température dite de préchauffage induite par conduction sur un point amont du trajet en cours
- Modulation de la puissance du laser pour atteindre la température désirée à ce point à l'interpolation suivante

Des investigations numériques sur plusieurs cas d'utilisation montrent l'efficacité de la méthode pour contrôler les zones surchauffées et pour homogénéiser la distribution de température simulée (Figure 10). La spécificité de ce modèle réside dans sa capacité à calculer directement la quantité d'énergie à fournir sans calculs itératifs. De plus, pour être au plus près de la technologie utilisée dans les machines, le comportement cinématique de la tête de balayage [4] et le temps de réponse du laser sont également intégrés dans le calcul.

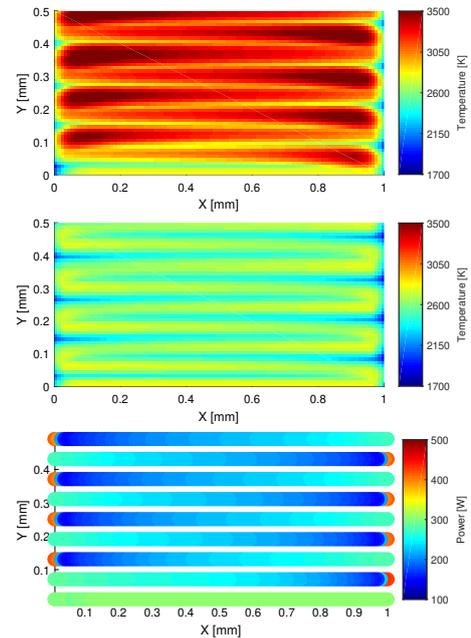


Figure 10 – carte de température pour une trajectoire zigzag discontinue, sans modulation de puissance (haut), avec modulation de puissance (milieu) et consigne de puissance modulée (bas).

### 4.3. Trajectoires de wobbling

Les trajectoires de balayage permettent de délivrer l'énergie au lit de poudre et ont un impact direct sur la distribution de la température. Cependant, les trajectoires de balayage actuellement utilisées sur les machines résultent principalement de procédés d'usinage et n'exploitent pas au mieux les performances des têtes de balayage. L'utilisation de trajectoires de wobbling,

initialement utilisées en soudage laser, a été étudiée pour améliorer la productivité du procédé [8]. Les modèles classiques de trajectoires de wobbling sont des courbes de Lissajous qui ne garantissent pas un dépôt d'énergie contrôlé. Aussi la méthode développée permet de simuler le dépôt d'énergie et de déterminer le motif de wobbling qui garantit le respect d'une densité d'énergie de surface donnée le long de la trajectoire (Figure 11).

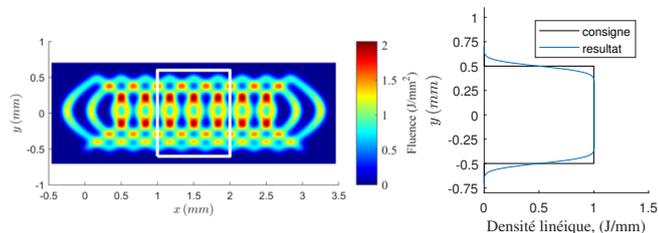


Figure 11 - Fluence surfacique d'une trajectoire de wobbling dont le motif est déduit du profil de fluence transverse imposé

#### 4.4. Optimisation instationnaire des trajectoires

Dans la littérature, les trajectoires de scanning proposées sont principalement basées sur des motifs existants, dont la pertinence n'est pas liée à la pièce à construire. Nous avons donc proposé un algorithme d'optimisation pour déterminer la trajectoire sans restriction a priori, sans motif prédéterminé [9]. En tenant compte de la dépendance temporelle de la source, le temps de fabrication est minimisé sous deux contraintes :

- Fondre la structure requise (fusion dans le domaine, et pas à l'extérieur du domaine)
- Éviter toute surchauffe provoquant des déformations inhérentes

Les résultats montrent que l'optimisation tend vers des trajectoires semblables quelles que soient les conditions initiales (Figure 12) et indiquent des pistes prometteuses pour définir des motifs paramétriques dans le cas de stratégies en damier ou pour coupler l'optimisation topologique de la forme et de la trajectoire.

## 5. CONCLUSIONS

Les activités de recherche collaboratives menées au LURPA dans le cadre du projet SOFIA ont permis de produire un certain nombre de résultats scientifiques publiés dans des thèses, des revues internationales et des brevets. Ces travaux ont été valorisés industriellement en étant pour certains intégrés dans les machines FormUp350 et ont contribué au développement de la dernière génération de machines FormUp350 V2. Enfin ces résultats ouvrent diverses perspectives notamment dans le pilotage de machines innovantes qui font l'objet du projet ANR JCJC ORACLE (22-26) et de la chaire industrielle ANR SOLARIA (23-27).

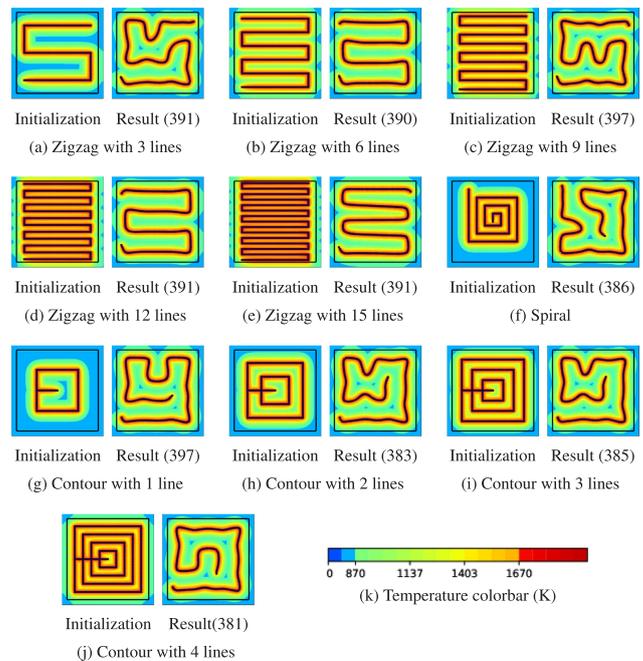


Figure 12 - Résultats d'optimisation instationnaire de trajectoires

## RÉFÉRENCES

- [1] Godineau K., Lavernhe S., Tournier C. Calibration of galvanometric scan heads for additive manufacturing with machine assembly defects consideration. *Additive Manufacturing*, 26:250-257, 2019.
- [2] Godineau, K. Optimisation du pilotage de chaînes opto-mécaniques pour l'exécution de trajectoires en fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre. PhD thesis, Université Paris-Saclay - ENS Paris-Saclay, 2019.
- [3] Le V.T., Quinsat Y. In situ calibration of galvanometric scanning head for laser powder bed fusion machines based on a vision system. *Int J Adv Manuf Technol* 111:1767-1783, 2020.
- [4] Godineau K., Lavernhe S., Tournier C. Influence of the CNC behaviour on the laser spot trajectory in LPBF process, EUSPEN Special Interest Group Meeting: Advancing Precision in Additive Manufacturing, St. Gallen (Switzerland) September 2021
- [5] Ettaieb K., Lavernhe S., Tournier C. A flash-based thermal simulation of scanning paths in LPBF additive manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 27(4):720-734, 2021.
- [6] Ettaieb, K. Contribution à l'optimisation des stratégies de lasage en fabrication additive LPBF. PhD thesis, Université Paris-Saclay - ENS Paris-Saclay, 2019.
- [7] Ettaieb K., Godineau K., Lavernhe S., Tournier, C. Offline laser power modulation in LPBF additive manufacturing including kinematic and technological constraints. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print., 2022.
- [8] Godineau K., Lavernhe S., Tournier C. Generation of wobbling scanning paths with prescribed energy fluence in L-PBF additive manufacturing process, *Computer-Aided Design*, Soumis.
- [9] Boissier M., Allaire G., Tournier C. Time Dependent Scanning Path Optimization for the Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process. *Computer-Aided Design*, 142:103122, 2022.
- [10] Boissier M., Coupling structural optimization and trajectory optimization methods in additive manufacturing, PhD thesis, Institut Polytechnique de Paris - École Polytechnique, 2020.

# D-TechnoSS, Design Technology for Strong Sustainability

Tatiana REYES <sup>a,\*</sup>, Nadège TROUSSIER <sup>a</sup>, Luis Miguel LOPEZ SANTIAGO <sup>a</sup>, Laure LAVORATA <sup>b</sup>,  
Lou-Lyne LECONTE <sup>b</sup>, Valérie LAFOREST <sup>c</sup>, Natacha GONDRAN <sup>c</sup>, Jenny FAUCHEU <sup>d</sup>, Melissa  
ESCOBAR CISTERNAS <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Université de technologie de Troyes (UTT), Unité de Recherche InSyTE, 12 Rue Marie Curie 10300 Troyes

<sup>b</sup> Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA), Laboratoire REGARDS, 2 Avenue Robert Schuman 51100 Reims

<sup>c</sup> Mines Saint-Étienne, Univ Lyon, CNRS, Univ Jean Monnet, Univ Lumière Lyon 2, Univ Lyon 3 Jean Moulin, ENS Lyon,  
ENTPE, ENSA Lyon, UMR 5600 EVS, F - 42023 Saint-Étienne France

<sup>d</sup> Mines Saint-Étienne, Univ Lyon, CNRS, UMR 5307 LGF, Centre SMS, F - 42023 Saint-Étienne France

\* e-mail : tatiana.reyes@utt.fr

## 1. INTRODUCTION

Jusqu'à présent, la recherche sur la soutenabilité s'est centrée principalement au niveau macro sur les acteurs institutionnels et les efforts de changement systémique. Au niveau micro, les chercheurs ont étudié le choix des produits par les consommateurs et leur élimination après usage [1]. Le projet D-TechnoSS, financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) (ANR-20-CE10-0006), vise à développer une meilleure compréhension des mécanismes de prise de conscience et de changements des comportements associés à l'adoption de démarches de conception participatives dans une posture de soutenabilité forte.

Le projet D-TechnoSS vise à explorer la proposition d'une intégration forte entre société et système de production. Dans le cadre du projet, il sera question de favoriser la prise de conscience des défis sociétaux, de faciliter le changement de comportements peu soutenables et d'accompagner le système productif dans un retour au seuil des limites planétaires. La méthode de recherche est basée sur une approche expérimentale, pour proposer un modèle d'évaluation de la soutenabilité dans une posture de soutenabilité forte.

Le projet D-TechnoSS a donc pour ambition de mieux comprendre et accompagner les transitions sociales ainsi que l'adaptation nécessaire du système de production et des méthodes de conception.

## 2. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

Le modèle de production et de consommation actuel se heurte aux limites planétaires [2]. Le respect des neuf limites permet à l'humanité de continuer à se développer et à prospérer pour les générations à venir [3].

Depuis le rapport Meadows, deux postures de d'intégration de la soutenabilité se sont développées, face aux défis socio-écologiques. La soutenabilité faible stipule

que le capital humain peut se substituer au capital naturel, mais de nombreux travaux scientifiques s'opposent à cette hypothèse. La soutenabilité forte, quant à elle, postule que le capital naturel ne peut être substitué, car il est impossible d'identifier tous les risques liés à l'extinction de certains services écosystémiques [4]. Dans ce cadre précis, il ne s'agit plus de développer de nouveaux outils ou de nouvelles méthodes, mais de questionner l'ingénierie et la gestion des connaissances pour aider à la transition d'une soutenabilité faible vers une soutenabilité forte. Cela nécessite de considérer différentes échelles allant du consommateur, du produit, de l'industrie et de la chaîne de valeur aux cycles planétaires et écologiques. Très peu de recherches sont menées pour développer les connaissances dans un cadre de soutenabilité forte. D-TechnoSS cherchera ainsi à combler les lacunes entre la conception des produits et leur acceptation par les consommateurs, afin d'offrir des produits soutenables en regard des contraintes socio-écologiques liées aux limites planétaires.

Dans une perspective de soutenabilité forte et sur la base de la théorie du donut de Raworth [5], l'alimentation constitue un pilier du plancher social. Cependant, les modes de production du secteur alimentaire ont parfois de lourdes conséquences sur l'environnement [6]. La production alimentaire actuelle constitue le principal facteur de dégradation et de dépassement de plusieurs limites planétaires. Notre façon de manger, nos choix de produits de consommation et le gaspillage sont des facteurs d'influence non négligeables.

En raison de son importance, l'alimentation sera le secteur d'étude du projet D-TechnoSS. Dans ce contexte, notre recherche s'articule autour de deux questions importantes :

*I. Quels sont les facteurs d'émergence des effets rebonds (et des transferts d'impact) dans les pratiques alimentaires et leur relation avec la conception ?*

II. Quels sont les principes ou critères à prendre en compte pour opérationnaliser la soutenabilité forte dans un contexte de conception ?

Ces questions nous permettront d'identifier les pratiques alimentaires pseudo-soutenables susceptibles de générer des effets rebonds et transferts d'impact ; le niveau de conscience des individus par rapport à ces effets ; et la manière de les intégrer dans la conception pour la soutenabilité. Nous avons l'hypothèse qu'une démarche de conception pour guider la transition vers la soutenabilité forte doit s'opérationnaliser à travers les principes de la sous-optimalité du vivant.

L'un des principaux résultats est de fournir une méthodologie de Dfs (*Design for Sustainability*) qui permette d'intégrer, d'une part, les connaissances sur les besoins et l'acceptation des consommateurs et, d'autre part, les impacts écologiques, afin de s'inscrire dans les limites planétaires. Cela passera par l'adoption d'une approche à plusieurs niveaux visant à évaluer les effets rebonds du produit conçu. Le résultat technologique final du projet est donc une nouvelle méthodologie d'ingénierie qui engage de nouvelles connaissances et pratiques dans le domaine des sciences de l'ingénieur, ainsi que de nouvelles connaissances issues des sciences humaines et sociales.

### 3. LES PARTENAIRES DU PROJET

Le projet D-TechnoSS est financé pour une période de 55 mois (1er mars 2021 - 30 sep. 2025). La nature de notre sujet de recherche implique l'intégration et la synergie de connaissances issues de différentes disciplines : il s'agit donc d'un projet interdisciplinaire. Le consortium regroupe des personnes travaillant dans les sciences de la conception en ingénierie, de la gestion et de la sociologie, ainsi que des sciences de l'environnement. Le Tableau 1 présente les partenaires scientifiques du projet.

Tableau 1 – Partenaires scientifiques du projet

Institution		Expertise
Université de technologie de Troyes (UTT) Unité de recherche InSyTE		Méthodologies de conception en ingénierie et D/S
École des Mines de Saint-Étienne IMT-MSE	Institut Henri FAYOL UMR-CNRS EVS 5600	Évaluation des impacts sociaux, écologiques et économiques des technologies. Sciences de l'environnement.
	Laboratoire Georges Friedel UMR 5307	Conception de produits et leur perception par les utilisateurs.
Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA) REGARDS EA 6292		Sciences de gestion et marketing. Développement durable.

### 4. MÉTHODOLOGIE

Le projet vise à explorer une nouvelle conception pour la soutenabilité, allant au-delà de l'intégration des critères environnementales telles que généralement considérées dans l'approche Ecodesign ou Product System Services. La première étape étant l'analyse des cadres qui changent le modèle de production en fusionnant la conception, la fabrication, l'utilisation et la fin de vie dans des cadres plus intégrés et locaux (ex. la conception sobre, les *low-tech*, et plus généralement les technologies alternatives).

L'état de l'art nous a permis de faire l'hypothèse que l'analyse de la relation entre l'Homme et les systèmes

techniques, de même que l'évolution des pratiques à petite échelle, préviennent les effets rebonds (bien connus dans les études de soutenabilité) et permettent de modifier les modèles et les politiques économiques.

#### 4.1. Les deux étapes de la méthodologie

Nous avons proposé une approche expérimentale pour mieux comprendre si la conscience des impacts des technologies sur la société et la nature suscite la modification du comportement de l'utilisateur et de la conception technique. Pour cela, la méthodologie adoptée dans notre projet a été divisée en deux parties qui sont corrélées et complémentaires à deux niveaux : l'étude de l'individu et l'analyse du processus d'écoconception des produits.

- La première partie concerne l'analyse des comportements cognitifs des consommateurs dans leur prise de décision liée aux produits. Cette analyse s'est déroulée en deux phases. La première consistait en une étude exploratoire avec des consommateurs/utilisateurs afin de comprendre la nature des interactions entre consommateurs et produits/services écoconçus. La seconde est un ensemble d'entretiens avec des experts de la consommation responsable, de l'écoconception et de l'écoconception alimentaire dont les objectifs étaient de mieux cerner ces notions, de comprendre leurs liens et d'aiguiller les choix méthodologiques.

- La deuxième partie concerne l'analyse des processus de conception axés sur le consommateur et utilisant des méthodes d'analyse d'ingénierie de conception. Ceci afin de proposer une nouvelle méthodologie Dfs adaptée à une approche de soutenabilité forte. Pour cela, un état de l'art a permis d'identifier les processus de conception associés à la soutenabilité forte. Vu l'inexistence d'une méthode de conception pour la soutenabilité forte, nous avons proposé des principes opérationnels pour l'intégrer en conception. Des études de cas à ce sujet sont encore en cours.

Ces deux parties sont associées à deux doctorantes aux compétences complémentaires, elles sont expliquées dans la section suivante.

#### 4.2. Articulation des travaux de thèse

Le projet associe et articule deux doctorats mobilisant des compétences fondamentales dans les sciences humaines et sociale d'une part, et dans la conception en ingénierie d'autre part. Deux doctorantes travaillent ainsi conjointement dans le projet.

La première thèse se concentre sur l'étude des pratiques alimentaires individuelles et familiales et de leurs éventuels effets rebonds. Le premier objectif a été l'identification des freins et leviers à l'adoption de pratiques alimentaires soutenables. Le second consiste à identifier les pratiques alimentaires susceptibles de générer des effets rebonds ou transferts d'impact, ainsi que le niveau de conscience des individus quant à ces conséquences écologiquement néfastes.

Les résultats du premier travail de thèse permettent d'alimenter la deuxième thèse. L'alimentation, et particulièrement la conservation des aliments, a été définie comme secteur d'illustration pour les étapes de validation des travaux [5]. De ce fait, les comportements des

consommateurs en matière d'alimentation et l'avis des concepteurs/experts dans ce domaine sont à considérer.

La deuxième thèse porte sur les méthodes de conception avec une approche de soutenabilité forte. Le premier objectif a été de faire un état de l'art sur les méthodes de conception associées à la soutenabilité forte. Le deuxième concerne une proposition de principes opérationnels de conception pour la soutenabilité forte. L'intégration des résultats de la première thèse concernant les comportements des individus sera cruciale. Le troisième objectif consiste à proposer et tester une méthode de conception participative qui intègre ces principes.

## 5. PREMIERS RÉSULTATS

Le travail commun et les échanges constants entre les doctorantes et les partenaires, ont permis de produire de premiers résultats, décrits dans le tableau suivant.

**Tableau 2 – Les principaux résultats des travaux de thèse**

Principaux résultats de la première thèse
<ul style="list-style-type: none"> <li>État de l'art sur les relations entre consommateurs, développement durable et écoconception [7]</li> <li>État de l'art sur la compréhension des consommateurs à l'égard des produits et services écoconçus [8]</li> <li>Hierarchisation des critères d'achat, et identification de catégories de produits et services écoconçus par le biais de groupes de discussion.</li> <li>Construction du cadre théorique et conceptuel sur les facteurs d'influence des comportements individuels en matière d'alimentation</li> </ul>
Principaux résultats de la deuxième thèse
<ul style="list-style-type: none"> <li>Analyse de l'état de l'art sur la soutenabilité forte et les processus de conception associés : la problématique (l'inexistence d'une méthode de conception qui intègre les exigences de la soutenabilité forte) a été établie</li> <li>Frise chronologique permettant de visualiser l'évolution des concepts reliés à la soutenabilité ainsi que des modèles de conception [9]</li> <li>Première proposition des principes opérationnels pour la soutenabilité forte en conception. Ce résultat fut testé lors d'un atelier avec des étudiants du master Prospective Design de l'EMSE.</li> <li>Atelier interne au projet D-TechnoSS réalisé afin de s'assurer du positionnement du concept de soutenabilité forte.</li> </ul>

L'un des objectifs du projet D-TechnoSS est d'opérer une large diffusion des résultats, en utilisant les publications sur les résultats scientifiques du projet, mais aussi des actions de transmission vers la société.

### 5.1. Production scientifique-académique

Les productions scientifiques ont pour but d'apporter de nouvelles connaissances. Les premières productions ont été partagées lors de conférences et colloques. Les productions actuelles sont déposées sur le portail HAL ANR en *Open Acces* (Tableau 3). Nous n'incluons pas les articles en cours d'écriture et de révision.

**Tableau 3 – La production scientifique du projet**

Titre, année	Commentaire
Soutenabilité forte [9] 2022	Il s'agit d'un support pédagogique pour aborder le concept de soutenabilité forte et son positionnement scientifique.
Concevoir la technologie dans la soutenabilité forte [10] 2022	Ce poster présente les travaux envisagés dans la deuxième thèse de doctorat du projet. Il a été présenté lors du <i>Congrès doctoral des Journées EVS 2022</i> .
Understanding of consumers' behaviours towards	Ce document donne un aperçu de la première thèse visant initialement à comprendre les comportements des consommateurs vis-à-vis des

ecodesigned products and services [8] 2022	produits et services écoconçus. Il a été présenté lors de l' <i>EURAM Doctoral Colloquium 2022</i> .
Consumers and Ecodesign: A Literature Review [7] 2021	La communication présente les relations entre consommateurs, développement durable et écoconception. Elle fait apparaître les difficultés de définition et leur limites inhérentes. Elle soulève ainsi la nécessité de repenser ces notions. Présentée lors de la <i>3ème Journée Marketing et Développement durable</i> .

### 5.2. La diffusion au grand public

Ces actions ont pour objectif de créer des moments de partage entre les chercheurs et avec le grand public, autour des dernières recherches menées dans nos domaines scientifiques. Le Tableau 4 fait une description des dernières interventions auprès du grand public.

**Tableau 4 – Les actions de diffusion**

Titre, année	Description
Parcours croisés à la Fabuleuse Cantine « Recherches et enjeux environnementaux » [11] 2022	Melissa ESCOBAR, doctorante au sein du projet a participé à l'émission radio « Parcours croisés » dans le cadre de la Nuit européenne des chercheurs 2022. Elle a parlé de l'importance du concept de soutenabilité.
La Terre bientôt INHABITABLE ? [12] 2022	Une vidéo qui présente de manière claire et concise l'essentiel des travaux de thèse sur la soutenabilité forte de Melissa ESCOBAR.
La Nuit européenne des chercheurs 2022 (intervention devant des collégiens)	Lors de la Nuit européenne des chercheurs 2022, Melissa ESCOBAR a réalisé deux interventions ludiques devant des collégiens pour les sensibiliser à la catastrophe climatique et à sa cause anthropique.
Webinar Rebound effects: what are the scientific and operational challenges for the socio-ecological transition? 2021	Lou-Lyne LECONTE, doctorante au sein du projet, a participé en collaboration avec le réseau S.mart à l'organisation et l'animation d'un webinaire sur les effets rebonds.

### 5.3. Ressources numériques

Des plateformes numériques ont été utilisées afin d'assurer une large diffusion de ces travaux. Nous espérons aboutir à une mise en réseau des étudiants, des chercheurs et des acteurs de la société civile. Le Tableau 5 montre nos actuelles plateformes de diffusion.

**Tableau 5 – Les plateformes D-TechnoSS**

<a href="https://d-technoss.utt.fr/">https://d-technoss.utt.fr/</a>
Notre site internet principal qui fonctionne comme vitrine de nos différentes activités. Le contenu a été pensé pour présenter de façon accessible nos thématiques, nos objectifs, nos nouvelles et l'information issue de nos partenaires.
<a href="https://www.linkedin.com/company/d-technoss/">https://www.linkedin.com/company/d-technoss/</a>
L'objectif d'être présent sur LinkedIn repose sur le fait de suivre et de générer de l'actualité sur nos thématiques d'intérêt, ainsi que de créer un réseau de partage avec des professionnels de l'industrie, des chercheurs et des étudiants.
<a href="https://hal-anr.archives-ouvertes.fr/search/index/?q=*%&amp;nrProjectReference_s=ANR-20-CE10-0006">https://hal-anr.archives-ouvertes.fr/search/index/?q=*%&amp;nrProjectReference_s=ANR-20-CE10-0006</a>
En tant que projet financé par l'ANR, D-TechnoSS utilise la plateforme HAL qui permet de rendre accessible (science ouverte) nos documents scientifiques pour consultation ou téléchargement.

Nous allons également intégrer les résultats du projet avec la plateforme [Ecocloud](#) du [GIS S.Mart](#) (plateforme partagée sur l'ingénierie soutenable).

#### 5.4. Les pratiques de recherche

Le fonctionnement du projet a été imaginé selon une "méthode traditionnelle de recherche". Cependant, tous les partenaires sont motivés à faire évoluer leurs pratiques, afin de mieux s'adapter aux limites planétaires. Dès le début du projet, nous avons réfléchi à l'adoption de pratiques permettant de réduire notre empreinte écologique, tout en maximisant les bénéfices du travail. La Figure 1 présente les chiffres clés liés aux émissions de nos réunions de travail.



Figure 1 – Chiffres clés

Les discussions sur nos expériences et nos analyses de fonctionnement permettront de contribuer à l'évolution des pratiques de recherche, en vue de répondre aux enjeux de soutenabilité. Cela nous aidera à promouvoir des comportements plus soutenables, ainsi qu'à identifier des partenaires partageant des valeurs et objectifs à ce sujet.

#### 5.5. Travail scientifique à venir

A ce jour, le projet D-TechnoSS a progressé de manière satisfaisante, notamment sur le plan scientifique. Des travaux sont en cours et aboutiront dans les prochains mois. Des ateliers scientifiques ont été réalisés par les doctorantes afin de collecter des données et de tester leurs hypothèses.

Concernant la première thèse, il est nécessaire de compléter les données déjà récoltées ; pour cela, des observations chez l'habitant ainsi que des entretiens sont en planification, dans le but de documenter les pratiques alimentaires. Concernant la deuxième thèse, il est prévu d'encadrer un projet industriel d'étudiants de Mines Saint-Etienne avec un éco-hameau, afin de tester la conception dans un contexte de soutenabilité forte. Un cas d'étude sera également réalisé lors de l'encadrement d'un mémoire d'étudiant (Master Prospective Design) pour tester la méthodologie. Par ailleurs, en 2023, une mobilité internationale de la doctorante a été envisagée dans un laboratoire spécialisé dans le Design (Stockholm Resilience Centre).

Finalement, l'avancement des travaux scientifiques nous a permis, en tant que consortium, d'entamer la rédaction d'un article pour le *Journal of Cleaner Production (JCP)*. Cet objectif devrait être atteint prochainement.

## 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons commencé à avoir des premiers résultats scientifiques relatifs au comportement des consommateurs face à la soutenabilité, et à la conception pour une soutenabilité forte. En outre, des articles scientifiques sont en cours de rédaction. Concernant la diffusion, nous envisageons d'organiser, dans les mois à venir, des événements de vulgarisation (ex. fête de la science), des ateliers scientifiques (ex. conférences, colloques et séminaires) et pédagogiques (lors des cours, sous le format TD ou TP, dans les établissements partenaires).

Les perspectives et impacts à moyen terme consistent à alimenter les programmes de formation en ingénierie avec ces nouvelles connaissances, et à transférer la nouvelle méthodologie à la société, notamment via des partenaires économiques et les étudiants. De même, nous espérons que nos retours d'expérience et résultats pourront inspirer et servir de référence à d'autres projets disposant de la même thématique de recherche. L'impact à long terme résidera en la capacité à travailler sur la transition sociale vers la soutenabilité, par la conception.

## REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche est réalisé grâce au soutien financier de l'Agence nationale de la recherche ANR (ANR-20-CE10-0006). Nous souhaitons aussi remercier toutes les personnes et organisations qui participent à nos expérimentations et au soutien de nos activités.

## RÉFÉRENCES

- [1] D. M. Martin, A. A. Harju, E. Salminen, and B. Koroschetz, "More Than One Way to Float Your Boat: Product Use and Sustainability Impacts," *J. Macromarketing*, vol. 39, no. 1, pp. 71–87, 2019.
- [2] W. Steffen *et al.*, "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet," *Science (80-. )*, vol. 347, no. 6223, 2015.
- [3] A. Boutaud and N. Gondran, *Les limites planétaires*. Paris: La Découverte, 2020.
- [4] P. R. Ehrlich and H. A. Mooney, "Extinction, Substitution, and Ecosystem Services," *Bioscience*, vol. 33, no. 4, pp. 248–254, Apr. 1983.
- [5] K. Raworth, "A Doughnut for the Anthropocene: humanity's compass in the 21st century," *Lancet Planet. Heal.*, vol. 1, no. 2, pp. e48–e49, 2017.
- [6] ADEME, "Quel est l'impact de notre alimentation sur l'environnement ?," 2021. [Online]. Available: <https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/conso/conso-responsable/impact-alimentation-sur-environnement>. [Accessed: 15-Mar-2023].
- [7] L.-L. Leconte, "Consumers and Ecodesign: A Literature Review," in *3ème Journée Marketing et Développement durable*, 2021.
- [8] L.-L. Leconte, "Understanding of consumers' behaviours towards ecodesigned products and services.," in *EURAM Doctoral Colloquium*, 2022, pp. 1–16.
- [9] M. Escobar, "Soutenabilité Forte." HAL, 2022.
- [10] M. Escobar Cisternas, "Concevoir la technologie dans la soutenabilité forte," in *Congrès doctoral des Journées EVS 2022*, 2022.
- [11] Radio Campus Saint-Étienne, "Recherches et enjeux environnementaux," *Parcours croisés à la Fabuleuse Cantine*, 2022.
- [12] CurieuxLive, "La Terre bientôt INHABITABLE !," 2022. [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=-IkkAm\\_\\_-J0](https://www.youtube.com/watch?v=-IkkAm__-J0). [Accessed: 12-Jan-2023].



# Bilan du projet PIA Hybridation <ET-LIOS> : accroître les opportunités de dissémination des résultats

B. Eynard <sup>a,\*</sup>, P. Bachmann <sup>a</sup>, T. Henocque, D. Picard, H. Chanal, M. Lombard, S. Debernard, M. Bricogne <sup>a</sup>, T. Reyes, C. Mazé, S. Charles, J.D. Guérin, S. Le Loch, C. Mehdi-Souzani, M. Galaud, F. Pourroy, S. Raynaud, B. Riera, Jean-Michel Suzan, C. Déprés

<sup>a</sup> Université de Technologie de Compiègne, rue du Dr Schweitzer, CS 60319, 60203 Compiègne cedex France

\* e-mail : benoit.eynard@utc.fr

## 1. INTRODUCTION

En période de pandémie COVID19, les universités et les établissements d'enseignement ont été confrontés à des changements majeurs et radicaux d'un jour à l'autre de leurs contextes de formation, d'organisation des moyens d'enseignements et ressources disponibles, etc. En raison de la pandémie, dans de nombreux pays, les professeurs, enseignants, formateurs ont été contraints de passer à des modèles d'enseignement à distance avec de nombreuses solutions virtuelles et informatiques qui, au départ, étaient plus ou moins efficaces et professionnelles. Une telle situation a également permis de démontrer empiriquement et de vérifier en partie la faisabilité d'un enseignement à distance et virtuel ou d'un enseignement hybride du fait des directives sanitaires prises dans l'urgence.

Après 6 mois de pandémie, le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a lancé un vaste appel à projet intitulé « Hybridation des formations de l'enseignement supérieur » lié au programme "Investissement d'Avenir" géré par la National Agence pour la Recherche - <https://anr.fr/fileadmin/aap/2020/aap-ia-ncu3-2020.pdf> . L'appel à projet ciblait spécifiquement le niveau licence sans restriction de disciplines.

Le groupe d'intérêt scientifique S.mart (<https://s-mart.fr>) a décidé de proposer un projet impliquant 14 universités et établissements universitaires dans le domaine de l'enseignement sciences et technologies de l'ingénierie. La proposition soumise intitulée <ET-LIOS> pour « Enseignements Technologiques de niveau Licence Ouverts pour une industrie du futur compétitive et Soutenable » était pilotée par l'Université de Technologie de Compiègne. Le projet visait à développer et à diffuser

des contenus de formation ouverts sous licences Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/?lang=fr-FR>). Ces contenus ont porté sur les formations en sciences de l'ingénieur et industrielles exploitant une infrastructure numérique distribuée entre les pôles régionaux du GIS pour assurer l'hébergement et la diffusion des contenus pédagogiques développés par les membres académiques du projet. De plus, ces infrastructures permettent la virtualisation de solutions logicielles de type industriel et dont l'usage est largement mutualisé au sein de la communauté S.mart.

Cet article est structuré comme suit : après une brève revue de recherche sur le modèle et les pratiques d'enseignement hybride, une présentation détaillée du projet <ET-LIOS> sera faite. Ensuite, les contenus spécifiques portant sur les modules développés par le consortium seront détaillés. Enfin, avant de conclure, diverses expériences d'enseignement basées sur un modèle hybridé ou non seront expliquées et les principaux résultats seront discutés notamment en ce qui concerne l'évaluation de la réussite des étudiants dans des schémas pédagogiques innovants.

## 2. ETAT DE L'ART

Au milieu des années 90, [1] a posé les bases des nouveaux supports d'enseignement avec les usages émergents de l'Internet et a analysé l'impact et l'influence des nouveaux médias dans la formation et l'enseignement. Au début des années 2000, l'enseignement à distance et virtuel s'est développé afin de tirer profit des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans l'amélioration des apprentissages et de la formation. [2] a souligné l'intérêt des TIC dans les cours en ligne et a mis en avant la valeur ajoutée de la fusion des instructions en ligne et de la salle

de classe traditionnelle. [3] ont présenté des applications intéressantes en des démarches d'ingénierie collaborative en projet pédagogique multi-sites et qui exploitaient une plateforme PLM. [4] ont défini la base des environnements d'apprentissage mixtes et détaillé les orientations futures de ce type de modèles pédagogiques. [5] a étudié la dynamique des classes virtuelles et à distance pour évaluer les performances d'apprentissage des élèves.

Dans un rapport de l'OCDE, [6] ont défini les fondamentaux à mobiliser pour le développement d'environnements d'apprentissage hybrides. [7], quant à lui, a proposé l'évaluation des pratiques émergentes en enseignement et apprentissage hybrides. [8] ont présenté le résultat d'un bilan sur la première décennie de formations hybridées avec des cours en ligne et à distance. [9] a proposé une deuxième revue dans le domaine incluant quelques conseils et recommandations pour les professeurs et les enseignants.

[10] a structuré le modèle pédagogique nécessaire et les fondamentaux d'un enseignement hybridé exploitant la nouvelle génération de TIC et les développements des cours en ligne ouverts et massifs (MOOC). [11] a analysé les technologies requises, y compris les nouvelles solutions numériques et virtuelles support d'une collaboration pédagogique intensive.

Evidemment, au début de la pandémie COVID19, les enseignants ont utilisé dans l'urgence de nombreuses et très diverses plateformes numériques de collaboration et solutions de réunion virtuelle [12], [13]. Ainsi, nombre d'expériences réelles ont été menées pour toutes les universités et établissements d'enseignement supérieur avec divers succès car les cours devaient continuer d'être dispensés. Cependant de nombreuses limites se sont également faites jour dans l'acquisition des connaissances et dans une progression efficace des apprentissages par les étudiants ainsi que dans la mise en œuvre de pratiques pédagogiques efficaces dans le domaine des sciences et technologies de l'ingénierie [14], [15]. Cette réalité a conduit également à des changements majeurs dans la position du pédagogue, dans l'organisation des séquences d'enseignement ou dans les objectifs opérationnels et réalistes pour les apprentissages [16]. Ensuite, la question de l'amélioration des modèles et de la transformation des pratiques en pédagogie hybride ou mixte est clairement au cœur des préoccupations après la période maximale de la pandémie. Revenu maintenant dans un contexte d'enseignement conventionnelle, les sujets de l'hybridation pédagogique offrent de nouvelles perspectives pour l'acquisition de connaissances et les apprentissages des étudiants.

### 3. PRESENTATION DU PROJET <ET-LIOS>

Dans le cadre du projet <ET-LIOS> (<https://et-lios.s-mart.fr>), l'ambition était de consolider et mutualiser les expérimentations acquises par les collègues dans les différents pôles régionaux du GIS S.mart, universités et établissements d'enseignement supérieur durant la période Covid19 en termes de formation à distance et de

continuité pédagogique dans les filières scientifiques et technologiques, notamment sur les sujets de l'Industrie du Futur tels que :

- Conception-Simulation-Prototypage 3D ;
- Fabrication et Métrologie Avancées ;
- Systèmes de Production Cyber-Physiques et e-Maintenance ;
- Jumeau Numérique et Virtual Commissioning pour la production automatisée ;
- Systèmes Intelligents et Modélisation Multi-Physique ;
- Ingénierie Soutenable et Responsable.

Le projet <ET-LIOS> s'est clairement inscrit dans la forte culture de mutualisation des ressources et de partage d'expériences de la communauté S.mart. Grâce au relais du GIS à organiser fréquemment des journées thématiques de formation et de diffusion et plus récemment, notamment en période de pandémie, à faire connaître les compétences développées sur de nombreux sujets à travers la tenue de webinaires (accessibles sur le site de S.mart).

Les objectifs du projet sont de fournir des plateformes et des moyens adaptés à une hybridation des enseignements scientifiques et technologiques voire, si l'évolution de la situation sanitaire le justifie, un basculement complet à distance. La spécificité de l'enseignement technologique et l'accès aux machines et équipements à caractère industriel rendent cet enjeu encore plus crucial et impactant afin de préserver le temps d'enseignement que nous jugeons indispensable sur les ressources technologiques tout en assurant les temps d'initiation, de préparation et de restitution en mode à distance.

Le projet <ET-LIOS> est structuré autour de deux grands sous-projets. Le premier concerne les infrastructures informatiques de virtualisation des ressources logicielles partagées supportées et administrées par les pôles régionaux. Le second propose des modules pédagogiques qui, pour leur réalisation, font appel à l'expertise et à l'expérimentation des membres de la communauté S.mart. Le passage de preuves de concept (du temps de la pandémie Covid19 ou ayant bénéficié de projets antérieurs développés au sein de S.mart) à une échelle pédagogique de plus grande ampleur pouvant être utilisée par l'ensemble de la communauté éducative et les experts de S.mart nécessite des développements supplémentaires et une robustification du contenu, des modifications et des portages des supports pédagogiques dans des environnements ad hoc.

#### 3.1. Conception-Simulation-Prototypage 3D

Concevoir un produit industrialisable, innovant et respectueux de l'environnement, reste un processus itératif qui mobilise de nombreuses méthodes et techniques, de (rétro)conception, de dimensionnement et de prototypage. Même si la communauté des concepteurs-intégrateurs de composants a longtemps cru et prôné que la simulation (dimensionnement des structures) aurait toujours le leadership sur le « choix de conception » (agencement des formes et des contours), les nouvelles technologies d'optimisation topologique pour la

fabrication additive, où le nombre de matériaux utilisables augmente considérablement, laissent présager une toute autre approche où la structure devient la composante principale voir exclusive des choix de conception.

L'hybridation de l'enseignement de cette ingénierie collaborative et de la chaîne conception-simulation-prototypage 3D semble tout à fait appropriée et présente une réelle opportunité de mettre l'apprenant de premier cycle très tôt dans cette démarche industrielle. Cependant cette hybridation fait face à plusieurs verrous :

- L'accès à ces logiciels métiers collaboratifs en distanciel nécessite des plateformes logicielles ad-hoc.
- La chaîne numérique est trop complexe à mettre en place dans sa globalité pour des étudiants de premier cycle et nécessite des développements pédagogiques spécifiques pour mettre en situation l'activité demandée.
- L'impression 3D des prototypes par les étudiants est très chronophage et l'accès aux équipements d'impression n'est pas organisé pour une utilisation en distanciel.

### **3.2. Fabrication et Métrologie Avancées**

L'hybridation de la formation en fabrication se heurte assez rapidement à la problématique des Travaux Pratiques (TP) nécessitant la manipulation des machines (machines-outils, robots, imprimantes 3D, Machines à Mesurer Tridimensionnelles...) pour mettre en œuvre le processus de fabrication et le procédé associé. Il est admis par l'ensemble de la communauté éducative, que le travail physique sur les machines est fondamental et irremplaçable sur un plan pédagogique : les travaux pratiques ont un rôle essentiel en permettant la confrontation au réel, l'identification des écarts par rapport aux modèles théoriques et la connaissance des éléments d'environnement et de sécurité. En ce sens, ils sont totalement incontournables dans une formation technologique à Bac +2/3. La crise sanitaire a révélé et créé des contraintes particulières qui rendent difficile leur mise en œuvre (désinfection, distanciation...).

L'objectif de ce module est de proposer et de développer des compagnons numériques permettant aux étudiants de préparer une séance de TP nécessitant la mise en œuvre d'un moyen de fabrication spécifique. La difficulté repose ici sur le nombre important de types de machines et de robots équipant les ateliers dans l'enseignement supérieur et l'hétérogénéité de leurs procédures de mise en œuvre.

### **3.3. Systèmes de Production Cyber-Physiques et e-Maintenance**

Dans un contexte de plateformes matérielles et logicielles multi-sites mutualisées pour la pédagogie et la recherche technologique, des mises en situation actuelles et pertinentes répondant aux attentes de l'industrie du futur (industrie 4.0) sont développées sur plusieurs thématiques dont la e-maintenance industrielle des

systèmes cyber-physique de production. Des outils d'aide au diagnostic et de maintenance à distance ainsi que des cellules flexibles automatique-robotique ont été spécialement développés pour répondre aux objectifs de formation académique.

Pour ce module, les modalités pédagogiques envisagées, à court et long terme, pour une immersion accrue de l'apprenant dans un processus crédible (industriellement fondé) en formation hybride présentiel / distanciel sont regroupées selon deux volets principaux : préparation à la maintenance, d'une part, et diagnostic et e-maintenance, d'autre part.

### **3.4. Jumeau Numérique et Virtual Commissioning pour la production automatisée**

L'enjeu majeur de ce module est d'assurer une continuité technologique entre les salles de travaux pratiques utilisables en présentiel et un travail en distanciel pour les enseignements en automatique de base classiquement réalisés dans les premières années de licence ou de BUT et en cycles préparatoires intégrés, à savoir l'automatique au sens contrôle-commande, la logique combinatoire, la logique séquentielle, jusqu'à la programmation en Grafcet sur Automate Programmable Industriel (API). En fonction de la situation sanitaire, de la disponibilité des salles de travaux pratiques soumises à des règles d'hygiène et une distanciation physique entre apprenants, ce projet permettra d'assurer une continuité pédagogique en supprimant les contraintes technologiques liées à l'utilisation de machines industrielles et des logiciels professionnels d'automatisation de ces machines. Cela ne sera possible que par l'utilisation de logiciels simulant des contextes professionnels et la mise à disposition des licences nécessaires.

Pour ce faire, ce module s'appuiera sur des jumeaux numériques acquis avant la période de confinement, Home I/O (fruit d'un partenariat entre le CReSTIC de l'URCA et la société Real Games - <https://realgames.co/home-io/>), et utilisés pendant le confinement par des élèves de l'UPHF. Un travail important a été réalisé en urgence par les enseignants chercheurs de l'UPHF et de l'URCA pour pouvoir piloter correctement avec MatLab le simulateur Home I/O, et des travaux pratiques ont été mis en œuvre et réalisés par plus de 200 étudiants dans ce contexte.

### **3.5. Systèmes Intelligents et Modélisation Multi-Physique**

Dans le contexte de la conception d'objets connectés, surveillés, adaptatifs et contrôlés, l'ingénieur intègre des fonctions structurelles, sensorielles et motrices liées par une intelligence. La conception et la réalisation de ces composants complexes, légers et résistants, doués d'une intelligence, capables de réaliser des mesures et d'actionner des mouvements ou des adaptations de leur comportement, nécessite la mise en œuvre de compétences nouvelles.

Les formations dans les spécialités des matériaux et structures intelligentes, des systèmes mécatroniques et robotiques mais aussi les formations scientifiques et technologiques plus générales intègrent désormais des modules de formation à la conception multi-domaines et multi-physiques. L'ambition de ces formations est de développer les compétences des étudiants à :

- Analyser et/ou concevoir l'architecture d'une structure multifonctionnelle par l'ingénierie système.
- Concevoir, dans une perspective finale d'intégration, les fonctions mécanique, électronique, informatique.
- Modéliser et simuler lesdites fonctions dans un environnement permettant de forts couplages entre les physiques.
- Réaliser des prototypes de composants ou de systèmes intelligents et/ou adaptatifs intégrant leurs fonctions structurelles, sensorielles et motrices.

### 3.6. Ingénierie soutenable et responsable

L'enjeu de ce module est de permettre l'appropriation des enjeux et la modélisation systémique des interactions Homme, Technologies et Nature selon plusieurs échelles spatio-temporelles. Ces modélisations aideront les entreprises à réduire ou, au minima, respecter les limites planétaires dans la conception des systèmes sociotechniques tout en évitant les effets rebonds.

Il s'agit donc de permettre aux apprenants de :

- Connaître le fonctionnement des cycles naturels (eau, carbone, biodiversité, etc.)
- Représenter et modéliser l'interaction Technologie – Homme (diagrammes d'influences physique et physiologiques (fonction, choix, etc) ; Analyse du cycle de vie social, théorie du donut, etc.)
- Représenter et modéliser l'interaction Technologie – Nature (MFA, ACV, limites planétaires, etc.)
- Représenter et modéliser l'interaction Homme – Nature (besoins, fonctions, connexion vitale, etc. de l'individu à la collectivité)

Le module proposé est composé de six briques pédagogiques :

- Enjeux associés aux changements climatiques (exemple : fresque du climat...)
- Enjeux liés à la biodiversité (exemple : fresque de la biodiversité...)
- Problématiques associées aux ressources (exemple : Jeu sur la consommation des ressources abiotiques...)
- Impacts sur l'Homme et la santé (sur la base du modèle des besoins de Henderson)
- Prise en compte des limites planétaires (Modèle des limites planétaires, théorie du Donut par rapport à la justice sociale=> des indicateurs de soutenabilité pour évaluer, concevoir, ...)
- Liens entre évolutions des technologies et système terre (Exemples d'analyse historique de

co-évolution technologie (technique et société) / système (physico-biologique) terre...)

## 4. PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS

Le projet a duré deux ans et s'est finalement terminé lorsque la pandémie a plus ou moins disparu. Les contenus pédagogiques ont été élaborés pour des apprentissages hybrides mais le contexte de formation a changé. Bien entendu la plus-value de l'hybridation est conservée pour des sessions spécifiques de pré-traitement (clarification des objectifs, problématiques et consignes pour les enseignements) de classe physique ou de post-traitement (débriefting collaboratif via chat ou vidéo apportant des réponses claires et efficaces de cours pratique permettant aux étudiants de comprendre leurs erreurs et d'identifier les inadéquations dans les apprentissages).

Les principaux résultats et retours d'expérience du projet <ET-LIOS> sont détaillés pour deux des modules d'enseignement susmentionnés.

### 4.1. Résultats du module conception-simulation-prototypage 3D

Dans ce module, selon les objectifs initiaux, les objectifs suivants ont été atteints :

- S'assurer que chaque étude de cas de conception à l'appui de la conférence mène à un travail de prototypage et non seulement à l'étape conceptuelle ou de réalisation de la conception technique ;
- Apporter systématiquement une confrontation virtuel/réel dans l'apprentissage des pratiques et des savoir-faire ;
- Proposer un apprentissage par tâtonnements, avec progression/séquencement adapté grâce à l'apprentissage à distance et aux principes hybrides ;
- Tenir compte du niveau de savoir-faire initial et de la progression des apprentissages des étudiants et les accompagner par des propositions de solutions graduées.

L'une des études de cas expérimentées se concentrait sur la conception, la simulation et le prototypage d'un trotinette (Figure 1). De telles expériences d'apprentissage ont été menées auprès de 100 étudiants de dernière année de licence et de première année de master.

Les principaux retours d'expérience à mentionner sont d'abord l'utilisation positive de petites vidéos expliquant les objectifs du cours et les buts pédagogiques, et deuxièmement, celle du didacticiel développé pour former les étudiants et leur expliquer les principales fonctionnalités d'un logiciel de conception technique. Bien sûr, dans l'utilisation efficace des logiciels, l'interaction des enseignants est incontestable. Mais après 8 heures de base, les étudiants sont suffisamment autonomes pour animer des séances de travail en

autonomie et progresser par eux-mêmes jusqu'à la prochaine séance avec les professeurs.



Figure 1 : Détails de la conception d'une trottinette

## 4.2. Résultats du module Ingénierie Soutenable et Responsable

Pour le module portant sur l'Ingénierie Durable et Responsable, les principaux objectifs étaient :

- Permettre la diffusion des enjeux de durabilité dans l'enseignement supérieur pour les enseignants et les étudiants (niveau licence et

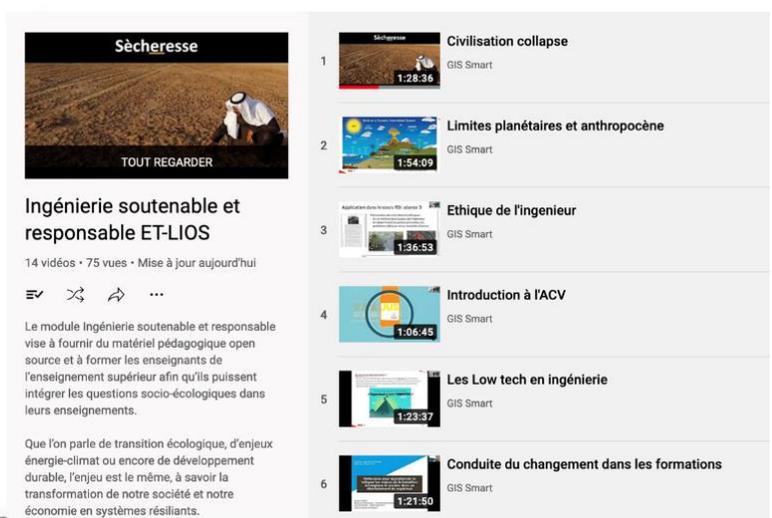
master) : Proposition d'un programme spécifique et intégré basé sur les compétences de durabilité ;

- Développer le contenu pédagogique d'une plateforme et assurer sa maintenance ;
- Assurer le développement d'un réseau de contributeurs de contenus et de co-apprentissage, abordé avec la création d'une base de données pédagogique commune et partagée.



Figure 2 : Architecture des contenus pédagogiques du module Ingénierie Soutenable et Responsable

Les développements de contenus pédagogiques pour une ingénierie durable et responsable (Figure 2) ont été structurés en 14 vidéos et environ 30 sous-modules pour l'apprentissage des étudiants selon des macro-compétences ciblées sur : la pensée systémique, l'analyse du cycle de vie, la limite terrestre, le changement climatique, l'ingénierie soutenable, l'éthique et la responsabilité sociale.



Tout d'abord, des professeurs ont été formés dans 10 universités et institutions académiques pour permettre une formation plus large des étudiants et une comparaison de leurs progrès concernant la vision commune et le cadre conceptuel. Cette approche a permis l'expérimentation de la formation de plus de 200 étudiants et a fourni un grand nombre de retours d'expérience. Les étudiants étaient en année de licence et

en première année de master. Aucune formation spécifique n'était requise pour suivre le module proposé. Les étudiants étaient fortement enthousiastes à l'égard d'un sujet urgent et majeur qui n'est pas souvent dispensé en première année au niveau universitaire. Les travaux pratiques de l'étudiant doivent encore être améliorés selon des approches de jeu sérieux ou d'apprentissage par projet.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le projet <ET-LIOS> a impliqué environ 100 professeurs et enseignants-chercheurs de 14 universités et institutions académiques françaises. Six modules pédagogiques ont été développés dans de nombreuses thématiques traitant de l'Industrie du Futur. L'article a synthétisé les résultats obtenus en deux modules traitant de : Conception-Simulation-Prototypage 3D, Ingénierie Soutenable et Responsable. L'objectif initial de fournir un modèle d'apprentissage hybride dans le contexte de la pandémie COVID19 a finalement évolué vers une séquence de classe physique, un apprentissage autonome, des travaux pratiques pour le prototypage d'une trottelette ou des jeux sérieux pour apprendre par la pratique. Un grand nombre d'étudiants à tous les niveaux de licence et aussi de première année de master ont été formés. Les commentaires fournis ont aidé à planifier les améliorations des modules développés.

Pour les perspectives, la prochaine série d'expériences devra être réalisée sur la base d'un plus grand nombre d'étudiants. La diffusion des contenus pédagogiques et de tous les supports pédagogiques doit être élargie à toutes les universités et institutions académiques candidates. Actuellement, le contenu de l'ingénierie des systèmes et de la conception durable est disponible en anglais. Un modèle collaboratif, partagé et contributif comme wikipedia devrait être défini pour des développements pédagogiques proactifs de contenus pédagogiques supplémentaires, de nouvelles études de cas, etc.

## 6. REMERCIEMENTS

Les travaux du projet <ET-LIOS> ont été financés dans le cadre des programmes investissement d'avenir sous la référence ANR-20-NCUN-0009.

## 7. REFERENCES

- [1] Kozma, R. (1994). Will media influence learning? Reframing the debate. *Educational Technology Research and Development*, 42(2), 7-19, 1994.
- [2] McCray, G.E. The hybrid course: Merging on-line instruction and the traditional classroom. *Information Technology and Management*, 1(4), 307-327, 2000.
- [3] Gomes S., Eynard B., Magnon L., Application du collecticiel ACSP en configuration multisites : cas du projet de conception d'une nouvelle table d'examen, 7ème Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée, La Plagne, France, 4-6 avril 2001.
- [4] Osguthorpe, R. T. et Graham, C. R. Blended learning environments: definitions and directions. *Quarterly review of distance*, 4(3), 2003.
- [5] Frazee, R. V. Using Relevance To Facilitate Online Participation in a Hybrid Course. *Educause Quarterly*, 26(4), 67-71, 2003.
- [6] Zitter, I. et Hoeve, A. Hybrid Learning Environments: Merging Learning and Work Processes to Facilitate Knowledge Integration and Transitions. *OCDE Education Working Papers*, 81, 2012.
- [7] Graham, C. R. Emerging practice and research in blended learning. In M. G. Moore (Eds.), *Handbook of Distance education*. Routledge, 2013.
- [8] Halverson, L. R., Graham, C. R., Spring, K. J., Drysdale, J. S. et Henrie, C. R. A thematic analysis of the most cited scholarship in the first decade of blended learning research. *Internet and higher education*, 20, 20-34, 2014.
- [9] Helms, S. A. Blended/hybrid courses a review of the literature and recommendations for instructional designers and educators. *Interactive Learning Environments*, 22(8), 804-810, 2014.
- [10] Linder, K. E. *Fundamentals of Hybrid Teaching and Learning*. New Directions for Teaching and Learning, 149, 2017.
- [11] Hall-Rivera, J. The blended learning environment: a viable alternative for special needs students. *Journal of Education and Training Studies*, 5(2), 2017.
- [12] Gopal, R., Singh, V., Aggarwal, A. Impact of online classes on the satisfaction and performance of students during the pandemic period of COVID 19, *Education and Information Technologies*, 26(6), 6923-6947, 2021.
- [13] Anushalalitha, T. Precovid, Covid and Post Covid Classes and Online Engineering, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 524, 533-546, 2023.
- [14] Mirriahi, N., Alonzo, D. et Fox, B. A blended learning framework for curriculum design and professional development. *Research in Learning Technology*, 23, 2015.
- [15] Rassudov, L., Korunets A., COVID-19 Pandemic Challenges for Engineering Education, 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020, Saint Petersburg, Russia, October 4-7, 2020
- [16] McCormack, C.M., Caldwell, B., Learner-Centered Design of Online Courses: A Transdisciplinary Systems Engineering Case Design, *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 28, 638-647, 2022.

**Articles de recherche et d'innovation  
pédagogique**



# Introduire les enjeux de soutenabilité dans les organisations via le Management par la Valeur

A. Lalevée <sup>a,b,c,\*</sup>, N. Troussier <sup>a,d</sup>, E. Blanco <sup>b,e</sup>

<sup>a</sup> UR InSyTE,, Université de Technologie de Troyes, Université Européenne de Technologie, 10000 Troyes, France

<sup>b</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

<sup>c</sup> Euro Contrôle Projet (ECP), 13100 Aix-en-Provence, France

<sup>d</sup> ENSAM, Arts et Métiers - campus de Paris, 75013 Paris, France

<sup>e</sup> Ecole de l'Air BA 701 13661 Salon Air

\* e-mail : alexis.lalevee@utt.fr

## 1. INTRODUCTION

Un projet autour de la gestion d'une organisation, mêlant des infrastructures et des personnes, est par nature complexe. Ces types de projets sociotechniques mêlent souvent acteurs publics et privés, ce qui nécessite de solides compétences en ingénierie dans un environnement multi-expertises pour la conception et la gestion des systèmes. Les attentes d'impact ou de valeur sociale et environnementale positive sont aussi importantes que le coût et la qualité du projet [1]. Ainsi, la gestion de projet doit intégrer les dimensions sociales et écologiques des exigences de durabilité de ces projets complexes. Nous définissons les projets d'organisation comme des projets (ou systèmes) complexes puisqu'il existe beaucoup d'incertitudes dues au nombre et à la diversité des parties prenantes qui la compose [2]. La soutenabilité doit être comprise comme les trois piliers du développement durable : les aspects économiques, sociaux et environnementaux dans un usage commun et étendu de ce concept [3], [4]. Les projets sont dits complexes car ils ont de nombreuses parties prenantes, un long délai de livraison, de nombreuses activités et nécessitent de multiples compétences pour atteindre certaines performances [5], [6].

Ainsi, les principales activités de Management de Projet (MP) concernent l'estimation des coûts, la planification, le contrôle des coûts et la gestion des risques, le contrôle de la qualité ou encore la gestion des contrats... Avant le lancement d'un projet, des études d'opportunité et de faisabilité doivent être réalisées [7]. Dans ces étapes spécifiques qui conduisent au jalon du projet, une approche sociotechnique doit être menée pour entreprendre la « meilleure » solution pour répondre à un besoin (construire ensemble besoins et principes de

solution). Cependant, de nombreuses méthodologies existent et la décision doit être basée non seulement sur l'atteinte d'objectifs techniques mais en apportant la plus grande valeur d'un point de vue économique, social et environnemental. Ainsi, il semble aujourd'hui difficile de choisir une approche globale capable de prendre en compte les démarches de soutenabilité dès les premières phases de réalisation des projets. En effet, ceux-ci doivent être analysés sur la phase d'utilisation mais aussi dans les phases de construction ou de démantèlement. Ces travaux sont cohérents avec la perception des praticiens qui considèrent qu'au-delà des exigences techniques, l'organisation humaine et les impacts environnementaux font partie des caractéristiques de complexité des projets. De plus, « l'engagement et le désengagement » des parties prenantes dans un projet rapportent l'importance d'une approche systémique, dans des projets complexes [8]. En effet, l'implication des parties prenantes dans un projet est dépendante de la Valeur perçue pour le projet. La polysémie de ce concept de Valeur doit alors être prise en compte [9]. Effectivement, ce concept pourrait permettre l'intégration de la soutenabilité mais aussi il pourrait être la base de nombreuses interprétations confuses. C'est pourquoi notre hypothèse de base est qu'une approche Valeur telle que décrite par [10], [11] pourrait à terme servir de levier d'intégration des enjeux de soutenabilité dans les projets organisationnels, tout comme dans les projets techniques décrits par [12]. Les praticiens d'Analyse de la Valeur soulignent que même lorsqu'elles sont identifiées, la valeur sociale et la valeur écologique des projets peut parfois se perdre derrière la rationalité économique et technique. L'objectif de cet article est de comprendre comment une méthodologie de gestion de projet complexe, à travers l'exemple du Value

Management, devrait permettre d'intégrer les enjeux sociaux et écologiques en phase amont de conception. La méthodologie de recherche s'appuie d'abord sur un état de l'art des méthodologies proposées et utilisées pour gérer un projet. De nombreuses méthodologies semblent avoir des lacunes importantes pour prendre en charge les enjeux de soutenabilité : elles ne sont pas utilisées tout au long du cycle de vie d'un projet avec une approche parties prenantes, elles ont une approche très technique ou temporalisée... Ainsi, la méthodologie de MP pourrait être utile pour intégrer des dimensions de soutenabilité dans la gestion de la performance des projets complexes. Les praticiens ont soulevé que la méthodologie qu'ils utilisent n'est pas parfaite et qu'il existe certaines limitations pour prendre en compte les enjeux de soutenabilité du fait que les paramètres sociaux ou environnementaux ne sont pas fortement mesurables en phase précoce des projets. Par la suite, une illustration est présentée pour démontrer qu'en pratique, la même situation pourrait être observée. À partir de ces deux observations, les auteurs montrent que les méthodologies de management ne sont pas adaptées aux enjeux sociaux et environnementaux actuels mais aussi que le Management par la Valeur (MV) doit pouvoir combler cette lacune. Enfin, les limites de l'étude et les travaux de recherche supplémentaires requis sont discutés.

## 2. REVUE DE LITTÉRATURE

Cette première section présentera ce qui semble être un « bon » Management de Projet (MP). Par la suite, certaines méthodologies de MP seront caractérisées.

### 2.1. Qu'est-ce qu'un "bon" Management de Projet ?

Deux définitions importantes du MP sont mises en évidence par [7], qui a passé en revue les outils utilisés pour le MP. Les éléments importants des définitions sont les étapes qui doivent être gérées : planification, organisation, suivi et contrôle ; pour tout le cycle de vie d'un projet. Ainsi, toutes les dimensions d'un projet doivent être prises en compte pour en avoir une optimale. Cela signifie que la gestion des parties prenantes est un point clé. En effet, ils sont acteurs du projet et contributeurs de la qualité du projet. De plus, la qualité des projets est liée à la valeur globale du projet. En effet, non seulement le coût ou le temps sont importants pour les acteurs d'un projet complexe, mais aussi les dimensions sociales et environnementales, qui sont aujourd'hui des préoccupations cruciales. Ainsi, [13] énumèrent de nombreux travaux de recherche tentant d'intégrer la durabilité dans l'Earned Value Management (EVM), une approche de gestion axée sur les coûts [7], à travers la consommation d'eau par exemple.

### 2.2. Méthodologies de gestion de projets couramment utilisées.

Le MP implique de nombreux outils et techniques comme souligné par [7]. Cependant, « il n'est pas possible de fournir une liste exhaustive des outils de

gestion de projet, mais il est possible de citer les plus connus et les plus répandus », selon [7]. Basé sur [7], [14], le tableau 1 ci-dessous montre les principales méthodologies et outils et leurs spécifications. Il est à noter que ce tableau concerne le nombre de publications majeures « +++ » (plus de 50 %) sur une dimension de la durabilité ; avec « ++ » entre 25 % et 50 % de publications et avec « + », moins de 25 % de publications dans le sujet. Ce travail a été réalisé avec la base de données ScienceDirect et un cadre de MP et de conception des systèmes complexes.

**Tableau 1 : Principaux outils de management de projets et leurs caractéristiques**

Nom	Dim Eco	Dim Env	Dim Soc	Phases du projet
Triple Constraint of Project	+++	++	++	Management global
Critical Chain Method	++	++	++	Management global
Work Breakdown Structure	++	++	++	Planning
Formalized Structure	+++	++	++	Etude de pré-projet
Value Management	+++	++	+++	Étude de pré-projet et CdV
Program Evaluation and Review Technique	+++	++	++	Planning
Logical Framework Approach	+++	++	++	Étude de pré-projet et CdV
Agile PM	+++	+	++	Management global
Internal Rate of Return	++	+++	+++	Phase d'implémentation du projet
Social Return of Investment	+++	+++	+++	Phase d'implémentation du projet
Net Present Value	++	+++	+++	Phase d'implémentation du projet
Earned Value Management	++	++	++	Phase d'implémentation du projet
Payback Period	++	+++	+++	Phase d'implémentation du projet
Formalized Risk Analysis	++	+++	+++	Analyse de risque

Il faut noter que certaines méthodes se concentrent sur certaines phases du cycle de vie (CdV) du projet, comme la « Work Breakdown Structure » [15], qui se concentre sur la phase de planning tandis que certaines abordent le projet de manière globale comme le « Triple Constraint of Project » [7]. Peu de méthodes semblent alors être adaptées à une vision globale avec la possibilité de faire des « zooms » sur certaines phases comme peu le faire le Management par la Valeur (MV).

### 2.3. Spécificités du Management par la Valeur (MV)

Avec l'analyse ci-dessus, nous pouvons montrer que le MV a un potentiel élevé pour introduire des enjeux de soutenabilité dans le MP. En effet, en phase initiale de conception, seule cette méthodologie semble prendre en compte partiellement les aspects sociaux et environnementaux. Le fait que le MV soit un « exercice de dialogue ouvert » [16] avec les parties prenantes semble crucial : d'autres méthodologies ne prennent pas en compte les parties prenantes tout au long du cycle de vie du projet. Il ne faut pas oublier que le MV est « un processus proactif, de résolution de problèmes ou de recherche de solutions, qui peut être utilisé pour améliorer la valeur fonctionnelle d'un projet en gérant son développement du concept de conception à l'utilisation opérationnelle », selon [17]. Ainsi, le concept de Valeur est crucial et devrait être défini avec une approche systémique dans un cadre de MP. Cependant, les principales méthodologies sont centrées sur l'aspect économique de ce concept. Le MV, qui semble être l'outil le plus systémique, devrait introduire plus d'outils pour « mesurer » les dimensions sociales et environnementales de la Valeur.

#### 2.4. Conclusion de la revue de littérature

La revue de littérature suggère que les enjeux de soutenabilité ne sont pas entièrement pris en compte dans aucune des méthodologies évoquées. On peut remarquer que l'aspect économique de la soutenabilité est clairement présent dans une majorité d'approches de PM. Ceci est cohérent avec les difficultés rencontrées par les consultants et les praticiens pour identifier et maintenir les valeurs sociales et écologiques tout au long des phases du projet. Il faut noter que la méthodologie de le MV sera développée dans cette étude de cas pour montrer en quoi la soutenabilité pourrait être intégrée dans un processus de gestion de conception du système.

### 3. CAS D'ILLUSTRATION

Avec la revue de la littérature, nous avons vu qu'il existe de nombreuses méthodologies de PM. Il semble que le MV soit capable d'intégrer les enjeux de soutenabilité. En effet, le MV peut faire émerger les exigences et les valeurs des parties prenantes. Dans cette section, un cas d'illustration est utilisé pour appuyer nos propos. Toutes les phases du MV sont détaillées pour montrer en quoi les aspects de soutenabilité pourraient être intégrés. La recherche a été conduite en partenariat avec une entreprise qui nous permet de conduire des observations de terrain. Cette analyse des pratiques est illustrée sur un cas pédagogique utilisé en formation. Cette illustration a été construite à partir de l'expérience des praticiens pour être représentative.

#### 3.1. Description

Prenons deux villes A et B éloignées d'une vingtaine de kilomètres l'une de l'autre. Les deux bénéficient d'un service hospitalier limité. L'objectif du projet est de trouver des solutions pour améliorer globalement le fonctionnement des services de santé dans cette région (enjeu 1). En effet, il existe des infrastructures et des personnels qui sont limités de part et d'autre, dans « 2 demi-services ». De plus, il y a des contraintes topologiques qui contraignent des échanges logistiques.

La société de conseil dont vous faites partie est sollicitée par le gouvernement pour déterminer quel est le projet (avec un intérêt particulier pour la gestion des parties prenantes) qui concevrait la meilleure solution. L'analyse de cas suit la méthode générale de l'Analyse de la Valeur (enjeu 2) telle que développée par ladite entreprise.

#### 3.2. Méthodologies de MV développée

##### 3.2.1. Les différentes étapes

- Identification des Parties Prenantes

Pour traiter ce cas, le contexte est important (enjeu 3) : quelles sont les différentes Parties Prenantes ? Cette première étape du travail, l'identification, se fait avec le Gouvernement, qui en connaît déjà certains par des contacts établis et différentes premières études topographiques ou socio-économiques. Cependant, il s'agit d'un processus itératif pour être complet et pouvoir évoluer. Ainsi, le gouvernement qui finance le projet est également le décideur. Les citoyens de la zone concernée sont impliqués comme toutes les entreprises (et travailleurs) qui travailleront sur le projet. De nombreuses Parties Prenantes ont pu être identifiées : dans cette illustration, il en existe une quinzaine.

De nombreux acteurs et le fait qu'ils soient d'une grande variété (enjeu 4) sont un élément clé : il s'agit d'en analyser la valeur vis-à-vis du projet en termes de perception de « coût » et de « bénéfices » (enjeu 5). Il est réalisé à travers une approche « Valeur » décrite ci-après.

- Identification des besoins et des fonctions associées

Après avoir identifié tous les acteurs, il est crucial de savoir ce dont ils ont réellement besoin, et de le caractériser. Les besoins (fonctionnels) de chacune des Parties Prenantes sont exprimés à travers une approche d'analyse fonctionnelle. Pour chaque étape du cycle de vie, les fonctions sont caractérisées et classées par « ordre d'importance » pour les Parties Prenantes. Dans ce cas, un travail collectif est important car il permet l'implication des Parties Prenantes. La fonction la plus importante est « soigner les patients ». Elle est notée avec 65% de l'importance du projet tandis que « améliorer le confort des patients » a 35% de préférences des Parties Prenantes. Ainsi, le Gouvernement souhaite revoir l'organisation du système de santé du territoire autour des 2 villes. Il souhaite améliorer sa Valeur Économique (enjeu 6) par exemple. De fait, l'objectif du projet est de réaliser des fonctions à un coût optimisé. La vie des citoyens est également en jeu avec la réduction de

l'attente lors de prises de rendez-vous ; il s'agit de Valeur Sociale (enjeu 7). Les objectifs de réduction des gaspillages des denrées périssables comme certains médicaments ou encore d'optimisation des flux pour réduire les émissions de CO2 se rapportent à de la Valeur Environnementale (enjeu 8). Ainsi, une approche systématique des étapes du cycle de vie doit être effectuée pour répondre à tous les besoins des Parties Prenantes, à chaque étape du cycle de vie du projet.

- Recherche de solutions

À partir des fonctions classées, des solutions sont explorées et documentées : elles répondent à peu près à chaque besoin, avec une priorité aux fonctions les mieux classées. De nombreuses solutions techniques et organisationnelles peuvent être imaginées. Sans entrer dans le détail, nous pourrions envisager le transport des patients d'une unité de soin à une autre suivant le problème ; et ce par différents moyens (ambulance, VSL...), le déplacement des machines et/ou des du personnel suivant le besoin ou bien encore la construction d'un nouveau site, si l'on ne souhaite pas conserver l'un ou l'autre des sites existants. Un autre aspect est la prise en compte de la situation géographique : où implanter les installations –si on en fait de nouvelles- et quelles pourraient en être les conséquences pour les patients, le personnel et l'ensemble de l'écosystème hospitalier existant ? Le réaménagement d'anciennes friches industrielles peut être considérées tout comme l'aménagement d'une colline proche. À cette étape, de réels défis existent pour (1) trouver un accord les parties prenantes avec des points de vue différents et (2) être capable d'expliquer aux décideurs comment les solutions ont été pensées. À cette étape, encore une fois, un travail collectif est effectué, et toutes les phases du projet et toutes les parties prenantes doivent être considérées : des installations temporaires pourraient devoir être mises en œuvre pour permettre l'accès au système de santé qui doit continuer à fonctionner malgré des changements techniques et / ou organisationnels, et ce pour l'ensemble de citoyens du territoire.

- Établissement de scénarios

Pour trouver des scénarios capables de répondre à une majorité de besoins des parties prenantes pour toutes les étapes du cycle de vie du projet, aucune limite de créativité n'existe mais certaines contraintes dues au contexte : des liens directs entre les deux villes ne sont pas possibles pour éviter l'expropriation forcée ; c'est une décision du gouvernement. Une autre limite est la faisabilité : il existe cinq sortes de faisabilité : réalisation technique, réponse aux besoins, estimation de coût acceptable, capacité à réaliser ou durée de l'étape de construction, niveau de risques (technique, contractuel, planning, surcoût... ). Ainsi, le budget ne peut permettre d'aménager la colline ; ce n'est pas envisageable pour ce projet. Une fois la faisabilité explorée, de nombreuses solutions évoquées précédemment peuvent être écartées. Avec ceux qui sont possibles, différents scénarios sont établis puis hiérarchisés. En effet, une solution consistant à construire un nouvel établissement de santé aurait un impact sur la géographie du territoire et sa gouvernance

tandis que des échanges logistiques impacteraient 1) la tranquillité des habitants, leur qualité de vie mais aussi 2) celle des patients et des soignants. Ainsi, différentes dimensions de la valeur doivent être intégrées au processus de prise de décision afin que le projet aboutisse, dans les temps.

- Prise de décision

Tout le processus mène à la prise de décision. Un schéma représentant la classification de la « création de valeur » globale pour chaque scénario est construit qui aide à prendre une décision justifiée. Dans cette étude de cas, le gouvernement décidera ce qui semble être le meilleur scénario, sur la base de diagrammes, ou quel scénario nécessite plus d'études pour prendre une décision finale.

### 3.2.2. Observations

L'approche basée sur des études de cas nous permet de dégager des caractéristiques liées à l'intégration de la soutenabilité via le MV au stade amont de la conception de projets complexes (voir Tableau 2).

**Tableau 2 – La méthodologie de MV**

Dimension économique	Dimension environnementale	Dimension sociale
Le coût du projet : quel est le montant de chacune des solutions ?	Par la considération des parties prenantes : elles doivent parler de leurs ambitions. Par exemple, les associations écologiques sont impliquées dans ce type de processus	Par la considération des parties prenantes : elles doivent parler de leurs ambitions. Par exemple, en prenant en compte les contraintes des entreprises

### 3.3. Résultats issus du cas d'illustration

Avec une approche de MV, de nombreux enjeux de soutenabilité sont pris en compte à travers le concept de « Valeur », qui concerne non seulement les aspects économiques mais aussi sociaux et environnementaux. De plus, une approche par les parties prenantes semble permettre une meilleure intégration de la Valeur : les PP sont impliquées dans le projet, ce qui permet une approche de co-création de la Valeur.

## 4. DISCUSSIONS

Tout d'abord, nous avons montré que les principales méthodologies existantes pour gérer les projets ne permettent pas d'intégrer les enjeux de soutenabilité dans les projets complexes. Ensuite, à travers le cas d'illustration, nous avons mis en avant que de nombreuses dimensions du concept de soutenabilité sont (plus ou moins) prises en compte dans la méthodologie de MV telle qu'elle existe. Ainsi, dans cette partie, nous essaierons de mettre en avant quelles sont les pistes sur lesquelles il faut entreprendre des travaux de recherche pour une intégration complète de la soutenabilité dans un cadre de MP.

#### 4.1. Management des Projets

De nombreux outils sont utilisés pour gérer un projet. Cependant, beaucoup d'entre eux sont très spécifiques en termes de portée (le temps et le coût sont les plus représentés) ou d'utilité à chaque étape d'un projet. Il existe l'étude d'avant-projet avec structure formalisée, composée d'une étude d'opportunité et d'une étude de faisabilité. C'est l'une des principales étapes avant de démarrer un projet, selon [7]. Cependant, cette réflexion en amont de la conception ne permet pas de savoir si le projet a une réelle utilité pour les parties prenantes. C'est un point qui mérite d'être soulevé et représente une limite majeure de ce travail : les parties prenantes doivent être davantage prises en compte dans la pratique. Les principales préoccupations de l'être humain sont liées à la soutenabilité : changement climatique, pollution problème de disparition de nombreuses espèces... Ces aspects ne sont pas pris en compte aujourd'hui dans les méthodologies de MP. Ainsi, pour gérer un projet, les dimensions de soutenabilité doivent être pilotées. Comme nous l'avons vu auparavant, les trois contraintes principales (délais, coût et périmètre) sont principalement liées à des préoccupations économiques. Le fait que les dimensions sociales et environnementales ne soient pas intégrées dans les phases amont de la conception et le pilotage de projets organisationnels semble problématique. En effet, l'être humain est non seulement l'utilisateur du système mais aussi le concepteur. En ce sens, l'intégrer dans la démarche paraît essentiel. Une autre limite à ce travail apparaît alors : l'aspect dynamique, à travers l'évolution du projet, doit être étudié ultérieurement.

#### 4.2. Management par la Valeur

Le MV est flexible et peut être utilisé à toutes les étapes d'un projet, comme le suggère la revue de la littérature. Cependant, comme de nombreuses méthodologies de MP, il ne s'agit pas d'une méthodologie capable d'intégrer, en l'état, les enjeux de soutenabilité dans les projets organisationnels aujourd'hui.

Dans la pratique, le concept de « Valeur » permet d'intégrer les enjeux de soutenabilité au MP. Effectivement, cette gestion par la Valeur est capable de soutenir une approche par parties prenantes qui semble intéressante. Par conséquent malgré que le MV ait certaines limitations, il semble être l'une des méthodologies les plus aptes à intégrer les enjeux de soutenabilité dans le MP, à travers le concept de « Valeur ». Il faut remarquer que ce concept devrait être davantage étudié dans un cadre de gestion de projet complexe pour avoir une définition forte, avec une approche non seulement théorique mais aussi pratique. Certaines lacunes existent comme l'absence d'aspects dynamiques et l'existence de certains paramètres capables de mesurer les

dimensions sociales et environnementales dans les premières phases d'un projet complexe. Le concept de « co-création » de Valeur, dans un cadre de projets complexes devrait être exploré dans de futurs travaux. Il correspond à une « valeur qui est supérieure à la somme des parties que les organisations individuelles peuvent créer par elles-mêmes et en interne » [18]. Cela semble correspondre exactement au processus utilisé dans une approche de MV. Il devrait permettre d'intégrer de nombreux enjeux de soutenabilité dans le MP.

### 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

À travers cet article, publié initialement sous le prisme de projets techniques complexes [12], nous avons démontré que le Management par la Valeur semble être une méthodologie solide pour soutenir une intégration des enjeux de soutenabilité dans le MP malgré quelques lacunes. La « Valeur » est un concept polymorphe et il devrait être une manière d'intégrer toutes les dimensions de la soutenabilité dans le MP. Comme le souligne [14], « on ne sait pas exactement ce que l'avenir réserve à la gestion de projet, mais avec des défis tels que la mondialisation, la diminution des ressources et l'augmentation de la population, il n'y a pas de véhicule plus approprié pour gérer de tels problèmes que la gestion de projet. ». Ainsi, ce travail de recherche est stratégique pour l'avenir du MP et plus précisément pour l'intégration dans les phases amont de conception et de décision des enjeux de soutenabilité.

Des travaux sont actuellement menés pour identifier et caractériser quels sont les paramètres capables de mesurer et comment traiter l'information pour une méthodologie plus systématique du MV. D'autres seront conduits sur l'aspect temporel : les projets complexes sont dynamiques et en tant qu'acteurs, ils devraient devoir être gérés « en temps réel ». Les deux aspects conduiront finalement à prendre de meilleures décisions dans un cadre de projets complexes qu'ils soient techniques ou organisationnels.

### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les praticiens d'Analyse de la Valeur pour leur contribution à ces travaux.

### RÉFÉRENCES

- [1] L. Shen, Y. Wu, and X. Zhang, "Key Assessment Indicators for the Sustainability of Infrastructure Projects," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 6, no. 137, pp. 441-451, 2011.
- [2] K. B. Hass and L. B. Lindbergh, "The bottom line on project complexity: Applying a New Complexity Model," in *PMI® Global Congress 2010—North*

- America, Washington, DC. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2010, no. June, pp. 1–16.
- [3] B. Brown, M. Hanson, D. Liverman, and R. Merideth, "Global Sustainability: Toward Definition," *Environ. Manage.*, vol. 11, pp. 713–719, Jan. 1987.
- [4] B. Purvis, Y. Mao, and D. Robinson, "Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins," *Sustain. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 681–695, 2019.
- [5] M. Bosch-Rekvelde, "Managing project complexity: A study into adapting early project phases to improve project performance in large engineering projects, PhD Thesis, Delft, The Netherlands," Delft University of Technology, 2011.
- [6] L. Yang, K. H. van Dam, A. Majumdar, B. Anvari, W. Y. Ochieng, and L. Zhang, "Integrated design of transport infrastructure and public spaces considering human behavior: A review of state-of-the-art methods and tools," *Front. Archit. Res.*, vol. 8, no. 4, pp. 429–453, Dec. 2019.
- [7] J. Kostalova and L. Tetreva, "Project Management and its Tools in Practice in the Czech Republic," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 150, pp. 678–689, 2014.
- [8] J. Lehtinen, K. Aaltonen, and R. Rajala, "Stakeholder management in complex product systems: Practices and rationales for engagement and disengagement," *Ind. Mark. Manag.*, vol. 79, pp. 58–70, May 2019.
- [9] W. Ben Ahmed and B. Yannou, "Polysemy of Values or Conflict of Interests: A Multi-Disciplinary Analysis," *Int. J. Value-Based Manag.*, vol. 16, no. 2, pp. 153–179, 2003.
- [10] NF X50-152:2007-09, "Value management — Basic characteristics of value analysis," *Assoc. française Norm. La Plaine Saint-Denis, Fr.*, 2007.
- [11] NF EN 1325:2014-04, "Value Management — Vocabulary — Terms and definitions," *Assoc. française Norm. La Plaine Saint-Denis, Fr.*, 2014.
- [12] A. Lalevé, N. Troussier, É. Blanco, and M. Berlioz, "The interest of an evolution of Value Management methodology in Complex Technical Projects for improving Project Management," *Procedia CIRP, "Life Cycle Eng. 2020 Conf.*, vol. 90, pp. 411–415, 2020.
- [13] B. Koke and R. C. Moehler, "Earned Green Value management for project management: A systematic review," *J. Clean. Prod.*, vol. 230, pp. 180–197, 2019.
- [14] T. Seymour and S. Hussein, "The History Of Project Management," *Int. J. Manag. Inf. Syst.*, vol. 18, no. 4, p. 233, 2014.
- [15] W. M. Wojciech Macek, "Methodologies of Project Management," *Contemp. Econ.*, vol. 4, no. 4, 2011.
- [16] N. A. Maznan, A. Jaapar, N. A. A. Bari, and M. Zawawi, "Value Management: Private Sector's Perception," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 50, no. July, pp. 383–391, 2012.
- [17] P. Fong, C. Hayles, and M. Graham, "Value management for sustainable decision making," *Proc. Inst. Civ. Eng. Eng. - PROC INST Civ. ENG MUNIC ENG*, vol. 163, pp. 43–50, Jan. 2010.
- [18] A. M. M. Liu, R. Fellows, and I. Y. S. Chan, "Fostering Value Co-creation in Construction: A Case Study of an Airport Project in India," *Int. J. Archit. Eng. Constr.*, vol. 3, no. 2, pp. 120–130, 2014.

# Freins et opportunités à la réparation dans les repair cafés : pour une transition vers des produits plus responsables

J. Mazudie <sup>a</sup>, C. Masclét <sup>a,\*</sup>, J.-F. Boujut <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP<sup>1</sup>, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

\* e-mail : cedric.masclét@g-scop.eu

## 1. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, le citoyen européen prend progressivement conscience de l'impact de sa posture de consommateur, à la fois sur la planète, sur l'économie et sur la société. Le modèle dominant actuel de production et de consommation linéaire (extraire, produire, consommer, jeter), à l'origine de forts impacts environnementaux pousse les instances gouvernementales à proposer des pistes telles que l'allongement de la durée de vie des produits (lutte contre l'obsolescence programmée), pour répondre à de nouvelles exigences éthiques [1].

Contrairement aux démarches de frugalité des pays en voie de développement sous-tendues par des contraintes économiques fortes [2] les sociétés industrialisées révèlent des démarches écologiques plus volontaristes. La réparation s'y positionne comme une des solutions à l'allongement de la durée de vie des biens de consommations. Des groupes industriels tel que Fnac, Darty, longtemps emblématique du développement de la société de consommation, favorisent désormais l'emploi local et un modèle plus respectueux des ressources de la planète [3]. Le Groupe SEB a également opté pour la une forme de durabilité : produits plus facilement démontables, pièces de rechange disponibles pendant plus de dix ans, partenariats avec des réparateurs [4]. A cela viennent s'ajouter des réparateurs indépendants, des distributeurs et détaillants dans la vente de pièces de rechange et dépannage, des acteurs de l'économie sociale et solidaire (entreprise d'insertion, réseau de ressourcerie, déchetterie), aux initiatives locales individuelles ou collectives de consommateurs.

Le rôle du consommateur est important dans l'allongement de la durée de vie des produits : Acquisition, utilisation, entretien, séparation sont autant d'étapes du cycle de vie sur lequel il peut influencer. La seule volonté de l'utilisateur ne peut cependant assurer l'efficacité d'une telle démarche. Une enquête récente auprès des

usagers de volants de badminton a établi que ces derniers promouvaient très majoritairement la solution du recyclage plutôt que le réemploi ou la réparation, cette dernière arrivant en dernière position dans l'arsenal des solutions de frugalité [5]. La technicité d'une telle opération est la principale cause de ce peu d'engouement.

Dans cet article, nous questionnons la démarche des repair café comme nouvel acteur du cycle de vie et souhaitons faire émerger ce que les acteurs du secteur identifient comme blocages et comme motivations relatifs à cette activité. La première partie de cet article abordera les circonstances de l'intégration et de la popularisation de la réparation à l'échelle du consommateur. Une seconde partie sera dédiée à la présentation de la méthodologie et développement de la recherche, avec la description de l'étude qualitative réalisée. Nous présenterons pour finir les résultats obtenus et la discussion.

## 2. ETAT DE L'ART

Les freins au développement du secteur de la réparation ont été identifiés par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), spécifiant que tous les biens ne sont pas couverts par une offre de réparation accessible, notamment en raison du manque de disponibilité des pièces détachées. Elle souligne également que le coût des actes de réparation pousse les consommateurs au rachat plutôt qu'à la réparation [6].

La lutte contre l'obsolescence programmée, légalement pénalisable depuis 2015 et l'indice de réparabilité, que les fabricants d'appareils électriques et électroniques ont obligation de faire apparaître sur leurs produits depuis janvier 2021, sont des dispositions législatives contraignantes. La France précède ainsi

l'union européenne dont la loi « right to repair » est encore en gestation.

Intégrer le consommateur dans une phase du cycle de vie (ici la réparation) reste complexe, car cela met en tension les paradigmes de confort mental et d'impacts économiques et écologiques liés à ses choix de vie [7].

Bien que la thématique du « Design For Repairability » ne soit pas mentionnée explicitement dans la littérature scientifique, la réparabilité y est souvent associée au Design for Assembly / Disassembly [8]. Des travaux récents issus du domaine de l'éducation visent à dégager des critères de conception garantissant la réparabilité [9]. Les auteurs insistent sur la complexité du processus de réparation lorsque la remédiation aux pannes et dégradations n'ont pas été anticipées par les concepteurs. C'est alors aux réparateurs de reconcevoir une alternative au design initial afin de s'adapter aux savoir-faire, ressources disponibles... et simplifier de nouvelles réparations à défaut de pouvoir totalement s'en affranchir.

Le choix de la réparation incombe essentiellement au consommateur. De nombreux facteurs, formalisés à travers le modèle RMB (repair motivations and barriers) [10], influent sur la motivation à réparer. S'agissant des particuliers, de multiples initiatives ont été menées individuellement ou sous forme de réseau local pour mutualiser les compétences et savoir-faire. En effet, ces dernières années ont vu une augmentation du nombre de centres de réparation et de formes d'ateliers communautaires ouverts similaires où les gens peuvent partager des outils, de l'espace et des compétences de réparation [11]. Gobert et al. [16] décrivent cependant un faible engouement pour les dispositifs R&R (Réparation et Réemploi) et le modèle majoritaire reste l'achat de produits réparés/reconditionnés par des structures alternatives.

Les repair cafés sont nés 2009 et ont rapidement gagné en popularité (plus de 2000 dans le monde actuellement). Bien que la réparation soit une pratique multiséculaire, elle peut désormais se pratiquer dans des tiers-lieux où les gens se réunissent pour réparer des objets du quotidien, indépendamment des fabricants et réseaux spécialisés de réparation. Les synergies et des échanges informels entre acteurs [12] s'y produisent sans aucune obligation financière. Les repair cafés rendent publique l'acte de réparer, et ces actions sont mises en scène comme des actions politiques qui luttent pour une transformation culturelle visant la durabilité des produits. Les motivations à la fréquentation de tels établissements sont aussi diverses que les formes qu'ils peuvent prendre [13].

Notre étude tente d'analyser à l'échelle locale la pertinence du repair café comme nouvel acteur du cycle de vie des produits et de comprendre ce qui peut s'opposer à sa croissance, du point de vue des acteurs.

### 3. MÉTHODOLOGIE

La démarche est fondée sur deux étapes : la collecte de données par des entretiens semi-directifs à réponses

libres et le traitement des données collectées à l'aide d'une grille d'analyse.

#### 3.1. Collecte de données

L'enquête par entretien semi-directifs menés auprès des consommateurs (bénéficiaires du service) ci-après nommés usagers- et des bénévoles (fournisseurs du service) des repair cafés a permis de récupérer des discours par thèmes avec informations enrichies [14]. Les données socio-géographiques caractérisant les interviewés ont été collectées (âge, profession, ancienneté), l'objectif étant d'obtenir des indicateurs susceptibles d'évaluer la capacité de ces acteurs de terrain à assumer une partie du challenge de la réparation par l'utilisateur. Le guide d'entretien est disponible sur demande auprès des auteurs.

Les entretiens ont été menés dans 10 repair cafés de l'agglomération grenobloise pendant 1 mois (mi-avril à mi-mai) auprès d'un échantillon de 25 personnes (20 bénévoles et 5 usagers « purs »). À l'image d'autres études [15], la population est majoritairement masculine et âgée de 60 ans en moyenne, donc représentative d'une forte proportion de retraités. Le niveau de qualification est élevé, souvent dans les domaines techniques : 14 des 18 interviewés se déclarent de niveau ingénieur, techniciens ou ayant eu une carrière scientifique.

#### 3.2. Traitement des données collectées

Des catégories d'analyse ont été définies de façon duale. Une revue de littérature en relation avec notre question de recherche a permis d'établir une première liste de catégories. Cette dernière a été enrichie par une pré-analyse du corpus au vu des points abordés lors des entretiens. Nous avons ainsi abouti à 3 catégories principales.

- Motivations et valeurs pour réparer et faire réparer. Nous y avons fusionné les aspects émotionnels et valeurs que le modèle RMB distingue sans réelle justification [10]
- Domaine technique. Elle concerne la structure des produits, leur conception et les caractéristiques des pièces intervenant dans leur réparation. Cette catégorie comprend également les techniques de démontage et les outillages requis. Elle intègre également tout ce qui a trait aux pièces détachées.
- Connaissances et compétences : Cette catégorie fait référence aux compétences et connaissances nécessaires à l'activité de réparation du point de vue des 2 groupes d'acteurs, leur acquisition pouvant être préalable à l'engagement de l'acteur dans le repair café, ou consécutive à l'expérience qu'il y a développée. Le partage de ces connaissances et compétences est également interrogé.

Nous avons itéré en introduisant de nouvelles catégories jusqu'à couvrir totalement le corpus d'analyse sans toutefois chercher à atteindre la saturation du corpus.

## 1. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Une première analyse de l'ensemble des items codés (cf. Tableau 1) montre que plus de la moitié concernent le domaine technique et que la quasi-totalité des interviewés (nombre d'individus déclarant) ont abordé cet aspect. En revanche, un quart des codes ont trait aux aspects connaissances et compétences, ce qui souligne l'importance de cette dimension dans la motivation des acteurs. Près de la moitié des codes concernent des aspects non techniques relatifs à des dimensions de motivation ou de sens attaché à cette activité. Le faible nombre de codes concernant les aspects organisationnels s'expliquent par le fait que cette dimension est peu connue des simples usagers des repair cafés et qu'elle intéresse peu les bénévoles réparateurs (3 répondants sur les 4 exprimés ont un rôle d'administrateur) même s'il s'agit d'une composante essentielle du fonctionnement de ces tiers-lieux.

**Tableau 1 – Items codés**

Catégories d'analyse	Répondants	Nombre de codes	Pourcentage
Domaine Technique	23	223	52 %
Connaissances et Compétences	22	104	24 %
Motivations et valeurs	23	76	18 %
Organisation interne	4	17	4 %

Dans la catégorie « domaine technique » les problèmes de démontabilité sont prépondérants. Ces derniers sont majoritairement vus comme la conséquence :

- d'un manque d'accès à la documentation (schémas techniques parfois compensé par des tutoriels vidéos de démontage)
- de la manière dont sont conçues et assemblées les pièces constituant le produit (carter et capotage avec vis, écrou ou clips).

Dans le domaine des compétences et savoir, les sous-catégories sont plus équilibrées avec toutefois une petite prédominance de la catégorie « compétence acquise par l'expérience ». Enfin les motivations à réparer ou faire réparer sont diverses et assez équilibrées. On distingue toutefois une sensible représentation du besoin de statut et lien social qui, en agrégeant *contact social* et *activité pour retraité*, représente presque 1/3 des items codés. Le prolongement de la durée de vie ainsi que l'appétence pour la réparation n'arrivent qu'ensuite.

L'analyse des verbatims, reproduits le plus fidèlement possible, dont des extraits sont dactylographiés en italique, illustre ces résultats en fournissant une vision plus précise de la perception par les acteurs.

### 1.1. Les freins à la réparation : une question technique

Le premier des freins évoqués par les bénévoles concerne l'accès à la documentation technique dont le rôle est essentiel pour combler un déficit de culture technique, inévitable aux vues de la multitude des systèmes rencontrés. Le besoin de documentation peut apparaître dès l'étape de démontage (manuels d'atelier ou « *tutos de démontages* »). L'absence de notice peut être compensée par un démontage minutieux et rigoureux, pourvu que l'utilisateur n'ait pas « *déjà démonté n'importe comment* » ou qu'il « *n'amène pas tous les morceaux* ».

La documentation sert également à « *trouver les références des pièces détachées* ». Elle se fait désormais essentiellement sur internet et dans ce domaine un fossé générationnel se creuse : « *les plus jeunes, familiers au smart phone ils arrivent à trouver des références* ». Les bénévoles recherchent également des schémas (électroniques) afin d'identifier les composants ou retrouver le principe d'un circuit. Généralement la documentation est requise pour des objets « *très spécifiques comme des imprimantes* ». Les plus anciens des bénévoles regrettent l'époque où les produits électroniques tels qu'« *un téléviseur y a 50 ans* » étaient « *livré avec un schéma [...] des signaux* ». Les notices actuelles ne concernent plus que le fonctionnement normal du produit et sont « *de moins en moins informatives, pour aider à la réparation* », elles peuvent aider au diagnostic pour décoder les « *voyants lumineux qui clignotent* » qui constituent « *un code du fabricant* ». Encore faut-il que leur traduction (parfois automatique depuis une langue étrangère) ne se révèlent pas trop « *folkloriques* » !

Un certain nombre de dispositifs mis en œuvre pour la démontabilité, selon les préceptes du DFMA et de l'éco-design, visent avant tout à la séparabilité des matériaux en phase de recyclage, plutôt qu'au démontage par des amateurs en vue de réparer. Les réparateurs souhaitent des systèmes démontables ET remontables ! Les produits éco-conçus sont encore peu nombreux à arriver en repair café. La conception des produits est donc souvent dénoncée par les bénévoles : « *les entreprises qui font de la conception eux, c'est pas trop trop leur soucis aujourd'hui* » « *Donc oui il y a des objets qui sont conçus pour être prêt à réparer oui, et d'autres non* », cela relèverait d'une « *pure démarche commerciale* » dont l'« *objectif est de ne pas réparer* ».

Ces techniques d'assemblages permanents posent problème : « *si c'est un boîtier qui a été soudé ou collé, on peut pas l'ouvrir* ». La substitution des procédés traditionnels d'assemblage tels que vis ou boulons ont été remplacés par des procédés de soudure ultrasons ou des clips plastiques qui peuvent casser au démontage. Et même lorsque les vis ont été conservées, elles nécessitent parfois « *des clés vraiment spéciales pour les démonter* » pour cause d'empreintes spécifiques ou de longueur d'accès inusuelles. Les bénévoles en sont parfois rendus à fabriquer eux-même l'outillage nécessaire. L'accessibilité des parties fonctionnelles est aussi évoquée comme paramètre pouvant allonger les

temps d'opération. Les produits sont généralement conçus avec des composants standard (roulements par exemple) mais les choix industriels rendent ces composants indémontables : « *on peut pas changer les roulements parce que c'est serti dans du plastique* », « *et ils mettent des points de colles ou je sais pas quoi, et c'est soudé !* ». La rentabilité des phases de production, couplées à des contraintes technologiques, s'oppose au souci de permettre un démontage manuel avec des outils standards. La miniaturisation est l'exemple type qui illustre une capacité des outils de production industriel s'éloignant des capacités humaines « *c'est beaucoup trop petit c'est beaucoup trop compact beaucoup trop complexe pour qu'on s'amuse à les ouvrir* », et elle sévit aussi bien dans le domaine de l'électronique que dans le domaine du capotage mécanique dont les « *petites pièces (comme des clips) qui cassent* ». Les acteurs reconnaissent également « *quelque chose de notable sur le prix d'achat* » des produits récents, sur la marque « *fiable ou pas* » et sur le positionnement en gamme du produit qui influent sur la réparabilité. « *L'appareil lambda qui n'est pas fait pour durer... parce qu'il est mal dimensionné, parce qu'il est mal étudié* » est souvent une source d'échec. Cela se retrouve notamment dans les outillages électro-portatifs : « *cette pièce qui est en plastique chez le particulier, elle est métallique chez le professionnel* ».

Les produits ne sont pas tous réparables. Une fois éliminé l'ensemble des objets difficilement déplaçables (gros électroménager comme les fours, les réfrigérateurs ou les machines à laver) on constate que les taux de réussite montrent une forte disparité selon les catégories de biens. L'ensemble des acteurs ayant entamé une démarche statistique s'accordent autour de 60 % de produits réparés avec succès. Cela varie de moins d'1/4 des appareils photos réparés, à plus des 3/4 de l'électroménager « *Le gros morceau c'est pour l'électroménager* ». Cette dernière catégorie (machines à café, aspirateurs...) est la plus représentée, suivie de l'informatique et de la hifi/vidéo. Ces tendances se retrouvent dans les statistiques européennes publiées par le réseau des repair cafés [16]. Ceci peut s'expliquer par le taux de possession et la fréquence d'usage « *l'aspirateur ! Ca veut pas dire qu'il tombe le plus en panne, ca veut dire que tout le monde a un aspirateur et que tout le monde s'en sert fréquemment* ». Certains produits disposent d'une très bonne réparabilité « *La machine à coudre, ça passe très bien, 75% de réussite (150/200)* », « *sur ces 420 aspirateurs, on en a réparé 250* ». Le degré d'électronique intégré au produit n'est pas déterminant dans le taux de réparabilité. Les pannes électriques sont fréquentes « *surtout au niveau de l'alimentation* » ou des moteurs « *à bout de souffle* » ou dont « *les balais (les charbons) ...sont usés* ». En revanche, les pannes mécaniques sont plus facilement réparables « *mécaniquement très souvent, on va dire à 90% du temps, l'objet est réparable* ». Un bénévole résume assez bien la situation : « *Panne mécanique : ca se change/répare. Carte, processeur, programme : si elle existe ok sinon on ne peut pas* ». Alors que des solutions alternatives existent pour pallier le manque de disponibilité des pièces mécaniques (collage, impression

3D...), l'électronique représente un véritable défi face à la généralisation des CMS<sup>2</sup> et des composants intégrés souvent non identifiés ou identifiables !

Plus optimistes, certains bénévoles affirment que la réparation « *dépend juste du temps et de l'argent qu'on veut y mettre dedans* ». L'investissement est alors proportionnel à la valeur du produit « *Un objet qui a plus de valeur une télé, on va y passer un peu plus de temps...* ». Le coût des pièces détachées, souvent rédhibitoire au vu de la valeur estimée de l'objet, ou le taux d'usure général, scellent le sort de ce dernier. De façon anecdotique, le temps de réparation peut également être un frein, principalement quand le délai d'approvisionnement en pièces détachées est jugé trop disproportionné par rapport au besoin d'usage.

## 1.2. Un enjeu écologique et social

Les repair cafés rassemblent des personnes disponibles, dévouées et passionnées de bricolage. Le terme bricolage est ici utilisé dans son acception définissant une activité de travaux nécessitant ingéniosité et habileté manuelle, souvent menées dans un souci d'économie, par des acteurs amateurs. L'ambition des repair cafés est de réduire les déchets, proposer une seconde vie aux produits et éviter ainsi de racheter un produit aux caractéristiques identiques. Le repair-café est donc vu comme un élément de l'économie circulaire avec une vision anti-consumériste [11]. Les acteurs évoquent le repair café comme « *l'endroit de la dernière chance* ». « *Notre objectif c'est quand même d'éviter que ça parte à la déchetterie, on veut intervenir* » L'argument économique est secondaire « *On fait des réparations pas chères, mais ce n'est pas ça l'objectif, on ne vient pas car c'est moins cher, on vient car si ce n'est pas là ça va partir à la déchetterie* ». Il y a cependant une aspiration égalitaire de rendre financièrement accessible la réparation pour certaines catégories de personnes (« *Il y a deux types de personnes : 1. personne nécessiteuse, c'est financièrement compliqué, or un diagnostic peut aller à 30 euros chez Darty, pour dire ensuite que l'appareil est mort...* »). Cela rejoint l'analyse effectuée par [17] dont il ressort que réparer c'est prendre soin des objets (pour leur durabilité et entretenir l'attachement nostalgique à l'objet) et prendre soin de l'environnement. En somme, une alternative aux SAV dont l'emprise semble avoir diminuée « *c'est fini le temps où les distributeurs de matériels divers des électroménagers et autres avaient leur propre dépanneur. Ça existait encore il y a pas longtemps* ».

Malgré la diversité des publics, la motivation et les valeurs se rejoignent également autour de la recherche d'un contact social (« *il est retraité depuis 2007 (15 ans) donc il y avait un besoin d'un lien social* »). La mise en exergue de l'aspect social se manifeste par la convivialité de la communauté (sorti de l'isolement, sentiment d'appartenance à une communauté, augmentation de la qualité de vie des quartiers). Les valeurs se rencontrent ainsi entre éviter de jeter, faire des économies et créer du lien social. Parmi les « Motivations et Valeur à réparer

### 2 Composants Montés en Surface

et faire réparer », le caractère social apparaît comme la principale motivation dans ces communautés. En cela, nos résultats recourent [11] en relevant le caractère d'inclusion sociale de ces initiatives par la convivialité : « ...*motivation du lien social avec les collègues et usagers. À la retraite, on ne voit plus beaucoup de gens...* ». Le critère économique n'est pas le premier des motifs, contrairement aux résultats annoncés dans [5] qui n'abordait pas l'aspect social. Cette convivialité peut même influencer sur l'engagement du réparateur : « *la personne qui est sympa on va quand même plus se donner les moyens que quelqu'un qui est désagréable* ».

### 1.3. La passion du faire et du partage

L'importance de l'expérience, systématiquement citée par tous les interviewés, est prépondérante dans la réussite de la réparation, notamment pour le diagnostic. Il est évoqué un « 6ème sens du bricoleur » et le regret qu'il n'existe « *pas d'école d'ingénieurs en bricolage* » ! Plus sérieusement, la pratique est reconnue comme la meilleure des écoles, surtout lorsqu'on n'a « *pas la science qui va avec* », mais la « *curiosité* » est un atout non négligeable.

La maîtrise des gestes techniques est également incontournable « *... en électronique, savoir faire une soudure correcte, dessouder correctement l'ancien composant* ». On notera qu'il n'existe pas de stratégie universelle de gestion des connaissances dans les repair cafés. Certains bénévoles sont spécialisés (types d'appareil, domaine de compétence technique...) par choix ou en réponse à un partage des tâches défini au sein de la structure. Ils cultivent cette spécialisation en n'opérant que sur certains types d'appareil, ou sous-systèmes techniques, relatifs à cette spécialité. D'autres constatent « *des compétences qui évoluent, il y a de l'apprentissage et de l'entraide* » dans une optique de « *polyvalence* » pour faire face à la diversité des objets rencontrés. Dans tous les cas, le regard des autres « *2ème avis* », l'entraide voire le travail en binôme est la règle, quitte à « *passer la main* » en cas de difficulté.

La passion du faire et le partage de compétences, connaissances du domaine, la transmission des valeurs motivent également les réparateurs bénévoles. Les compétences nécessaires pour les activités peuvent avoir été développées depuis fort longtemps (hobby ou expérience professionnelle) mais il y a également au sein du repair café une transmission de connaissances entre bénévoles qui aide à une plus grande efficacité et un gain de temps considérable. Les plus âgés sont notamment cités comme une « *une mine d'or en termes d'expérience* » car ils auraient « *connu une époque où ils ont eu à réparer des choses en fait, qu'aujourd'hui les formations n'existent même plus !* ». La nécessité d'une « *transmission générationnelle de la culture technique* » devient de facto une des missions des repair cafés. La réciprocité est aussi vraie face à des techniques difficiles à maîtriser par les plus anciens comme la recherche sur internet ou l'impression 3D « *faut être bon pour programmer, dessiner la pièce et réaliser* ». Le partage s'effectue également entre repair cafés,

notamment dans la mise en réseau de documentation ou la contribution à des initiatives plus larges [18].

Le partage de connaissances se fait également entre bénévoles et usagers lors de chaque réparation d'appareils avec explication du fonctionnement interne et de l'objet de la panne. L'un des objectifs des repair cafés est d'associer l'utilisateur à l'acte de réparation dans une perspective éducative. Cela requiert parfois de la « *patience* » afin d'établir une relation différente des relations de services commerciaux. Cependant, comme le note dans [13], le manque de volonté des usagers à contribuer à la réparation, et les compétences pédagogiques parfois limitées des bénévoles, sont souvent un frein à la croissance de cette activité « *... les gens ils ont parfois beaucoup de bonne volonté, ou sont un peu bricoleurs mais le dépannage c'est quand même quelque chose de spécifique quoi ! y a une manière de fonctionner, il y a une démarche quoi...* ». Le succès d'une réparation est souvent lié au rôle de l'utilisateur dans l'entretien et la bonne utilisation de son appareil. Dans le cas contraire, les pannes apparaissent par « *faute de compétences...* » ou pour cause d'« *insalubrité [qui] entraîne parfois d'autres pannes (exemple du détartrage, nettoyage, graisse sur composants de la cuisinière, four à raclette dont les matières grasses s'infiltrent dessous et ça fait des courts-circuits)* ». La lecture du « *manuel d'utilisation* » est souvent négligée alors qu'il devrait permettre de comprendre que « *ce n'est pas comme ça qu'il faut faire* ». Cette éducation à l'usage (en médiation) où l'utilisateur a « *participé à cette expérience enrichissante de la réparation* » est rendue possible par la mise à disposition d'espaces et d'outils qui peut s'apparenter à la notion de communs.

## 2. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a montré la volonté de circularité qui ressort des activités des repair cafés et mis en avant l'appétence sociale au-delà des aspects techniques et intellectuels de la réparation. Les acteurs ne reconnaissent pas de véritable structuration à l'échelle nationale, mais plutôt quelques « *règles d'or* » partagées comme celle de « *ne pas concurrencer les réparateurs professionnels* ». Ceci exclut donc certains objets pour lesquels un véritable réseau de réparateurs professionnels existe (par exemple les smartphones). Bien qu'autonomes, un besoin de mise en réseau se fait sentir : partage de documentation, stock de pièces détachées... Les freins à la réparation sont souvent techniques et vus par les acteurs comme une volonté délibérée des fabricants de ne pas intégrer la réparation amateur dans leur cahier des charges. Le modèle économique actuel généralisant la non divulgation des données techniques et, plus généralement, des savoirs industriels a été récemment renforcé par la législation portant sur le « *secret des affaires des entreprises* ». Le décalage croissant entre les process industriels (procédés complexes basés sur des machines et outillages coûteux) et les moyens à disposition des réparateurs amateurs constitue aussi une difficulté. Dans ce sens, il serait souhaitable de revenir à des techniques

accessibles à l'échelle humaine, exige que, par exemple, la miniaturisation effrénée ne satisfait pas. Les produits éco-conçus ont trouvé leur place dans l'offre des grands fabricants, mais l'accent est essentiellement mis sur la recyclabilité et les impacts sur l'environnement. Il existe une grande attente des usagers consultés pour un allongement de la durée de vie par la fourniture conjointe des spécifications et données techniques avec le produit. Ce besoin est particulièrement vivace lorsque les pièces détachées sont introuvables ou trop chère pour justifier économiquement une réparation.

Des opportunités existent cependant, aidée par quelques fabricants. Le Groupe SEB<sup>3</sup>, que nous avons interrogé, a initié dès 2010 le développement de produits économiquement réparable à long terme. Elle s'appuie sur une garantie de démontabilité (et remontabilité) des produits, un stock de pièces de rechange dont le coût par produit est inférieur à celui d'un nouvel appareil et un réseau important de réparateurs formés et une philosophie interne déployée sur l'ensemble de ses acteurs. Du côté des repair café, le maillage du territoire et la notoriété de ces tiers-lieux est encore faible mais grandissante. Ce dispositif peut représenter un levier intéressant des politiques publiques de développement du lien social dans les territoires en alliant une vertu écologique à une vertu sociale de transmission et d'animation. Les motivations écologiques n'apparaissent cependant pas centrales dans cette enquête et nous le percevons plus comme un alibi de personnes étant de toute façon attirées par le « bricolage ». En revanche, l'un des véritables moteurs actuels semble être le lien social que chacun y construit. Nous avons cependant souligné un besoin de renouvellement générationnel et de transmission d'expérience vers les plus jeunes. En retour, l'intégration des compétences en gestion de l'information numérique et en nouvelles technologies de fabrication permettront, collectivement, de surmonter les forts enjeux de durabilité à venir.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient chaleureusement l'ensemble des bénévoles et usagers des repair cafés ainsi que le vice-président du Service Après-Vente corporatif et Satisfaction des consommateurs du groupe SEB qui ont accepté de consacrer un peu de leur temps à répondre à nos questions.

## 3. Références

- [1] « Durée de vie des produits », *Ministères Écologie Énergie Territoires*, 2021. <https://www.ecologie.gouv.fr/duree-vie-des-produits> (consulté le 21 juin 2022).
- [2] Radjou Navi et Roberts Kevin, *Jugaad innovation: think frugal, be flexible, generate breakthrough growth / Navi Radjou, Jaideep Prabhu, Simone Ahuja; [Foreword by Kevin Roberts,...]*. San Francisco: Jossey-Bass, 2012.
- [3] R. Koenig, « Fnac Darty: la bataille pour des produits durables et réparables », *Le journal de l'école de Paris du management*,

3 <https://www.groupeseb.com/fr/reparabilite>

vol. N° 149, n° 3, p. 22-29, mai 2021, doi: 10.3917/jepam.149.0022.

- [4] J. Tronchon, « La révolution circulaire du Groupe SEB », *Le journal de l'école de Paris du management*, vol. N° 150, n° 4, p. 16-22, juill. 2021
- [5] R. Vandekerckhove, I. Moons, et E. Du Bois, « Introducing repair in sports' consumables: Investigation of repairability of badminton shuttles », *Journal of Cleaner Production*, vol. 326, 129229, déc. 2021.
- [6] A.-L. Rebaud, « Vers Une Économie Circulaire En Europe », *Développement durable*, n° 37, p. 91, 2017.
- [7] Le labo de l'économie sociale et solidaire, « Low-Tech et Economie sociale et solidaire: Pour des métropoles Low-tech et solidaires. » février 2022.
- [8] E. Bracqueney *et al.*, « Analysis of evaluation systems for product repairability: A case study for washing machines », *Journal of Cleaner Production*, vol. 281, p. 125122, janv. 2021.
- [9] N. Terzioğlu et R. Wever, « Integrating Repair into Product Design Education: Insights on Repair, Design and Sustainability », *Sustainability*, vol. 13, n° 18, Art. n° 18, janv. 2021.
- [10] N. Terzioğlu, « Repair motivation and barriers model: Investigating user perspectives related to product repair towards a circular economy », *Journal of Cleaner Production*, vol. 289, p. 125644, mars 2021.
- [11] K. Bradley et O. Persson, « Community repair in the circular economy – fixing more than stuff », *Local Environment*, 27 (10-11), 1321-1337, févr. 2022.
- [12] E. Ross, « Tiers-Lieux dans les villes moyennes: l'exemple de villes moyennes dans la Grande Région Est et dans la banlieue d'Amsterdam », *interventions économiques*, n° 60, déc. 2018.
- [13] R. M. Moalem et M. A. Mosgaard, « A Critical Review of the Role of Repair Cafés in a Sustainable Circular Transition », *Sustainability*, vol. 13, n° 22, Art. n° 22, janv. 2021.
- [14] G. Imbert, « L'entretien semi-directif: à la frontière de la santé publique et de l'anthropologie: », *Recherche en soins infirmiers*, vol. N° 102, n° 3, p. 23-34, sept. 2010.
- [15] E. Schägg, S. L. Becker, et P. Pradhan, « Thwarted visions of change: power and demographics in repair cafes and urban sustainability transitions », *Urban Transformations*, vol. 4, n° 1, p. 1, mars 2022.
- [16] repaircafe.org, « Factsheet\_RepairMonitor\_2021\_EN.pdf », 2021. Consulté le: 30 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.repaircafe.org/wp-content/uploads/2022/04/Factsheet\\_RepairMonitor\\_2021\\_EN.pdf](https://www.repaircafe.org/wp-content/uploads/2022/04/Factsheet_RepairMonitor_2021_EN.pdf)
- [17] M. Meißner, « Repair is care? - Dimensions of care within collaborative practices in repair cafes », *Journal of Cleaner Production*, vol. 299, 126913, mai 2021.
- [18] G. Getto et J. T. Labriola, « iFixit Myself: User-Generated Content Strategy in "The Free Repair Guide for Everything" », *IEEE Transactions on Professional Communication*, vol. 59, n° 1, p. 37-55, mars 2016.

# Sensibilisation à la soutenabilité forte en conception : une expérience pédagogique

M. Escobar <sup>a,b,c,\*</sup>, V. Laforest <sup>a</sup>, N. Troussier <sup>b</sup>, J. Faucheu <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Mines Saint-Etienne, Univ Lyon, CNRS, Univ Jean Monnet, Univ Lumière Lyon 2, Univ Lyon 3 Jean Moulin, ENS Lyon, ENTPE, ENSA Lyon, UMR 5600 EVS, F-42023 Saint-Etienne, France

<sup>b</sup> CREIDD UR InSyTE Université de Technologie de Troyes, 12 rue Marie Curie 10010 Troyes, France

<sup>c</sup> Mines Saint-Etienne, Univ Lyon, CNRS, UMR 5307 LGF, F-42023 Saint-Etienne, France

\* e-mail : melissa.escobar.c@emse.fr

## 1. INTRODUCTION

Les contraintes sociétales, telles que les crises écologique et sanitaires, favorise créativité et innovation influençant les outils et les méthodes d'ingénierie et de conception [1][2]. Formulée premièrement par Daly et Costanza en 1992 [3], la soutenabilité forte est un paradigme qui est exploré, décrit et défini à travers le prisme de disciplines complémentaires [4] [5] [6]. Au vu de cette littérature multidisciplinaire, trois aspects tendent à mettre en évidence une soutenabilité forte (Strong Sustainability, SoSy) :

- Le « milieu », exploré dans les discussions philosophiques et éthiques, représente une intégration complète des êtres humains et des activités humaines (sociales et économiques) au sein de l'écosphère (système terre-eau-atmosphère) [4] [5] [7] [8] [9].
- La « régénération » est aspect prenant en compte les différentes temporalités (court, moyen et long terme) des organismes vivants [10] et les cycles biogéochimiques de la planète [11] qui mettent en évidence les interrelations des systèmes vivants [12]. L'« espace opérationnel sûr et juste » est lié aux frontières planétaires [13] [14]. Il s'agit de trouver un espace de fonctionnement sûr qui permette le bien-être social de l'ensemble de la population [15] tout en préservant la capacité de la planète continuer à subvenir aux besoins des générations futures [14].

D'un point de vue pédagogique, cet article s'intéresse à l'influence de la sensibilisation des étudiants à la SoSy sur leur phase d'idéation dans un processus de conception.

## 2. EXPERIMENTATION

L'expérimentation a été menée en avril 2022 lors d'un atelier « Design et Créativité » avec une vingtaine d'étudiants inscrits dans trois cursus différents (design, management et ingénierie). L'objectif principal est l'étude de l'influence de la sensibilisation des étudiants au paradigme SoSy sur les caractéristiques des concepts proposés par les étudiants lors d'un processus de conception.

### 2.1. Méthodologie

Pour l'expérimentation, les élèves ont été répartis en 2 sous-groupes de 12 élèves dans 2 classes différentes, et ont été invités à travailler en binômes (binômes A-E et binômes F-J). En salle 1, le brief « conservation » était proposé comme suit : « Conserver les aliments est un besoin essentiel pour l'homme. Ce besoin se révèle dans une grande variété de solutions de conservation des aliments à travers le temps et les cultures. Pouvez-vous imaginer votre scénario de conservation des aliments ? » En salle 2, le brief « cuisson » est proposé : « La cuisson des aliments est un besoin essentiel pour l'homme. Ce besoin se révèle dans une grande variété de solutions de cuisson des aliments, à travers les époques et les cultures. Pouvez-vous imaginer votre scénario de cuisson ? »

Lors de la première séquence (1 heure), considérée comme la situation de référence, les binômes A-F étaient en salle 1 et les binômes G-L étaient en salle 2. Elles disposaient d'une heure pour générer des idées, sans contraintes, et livrer leur concept à travers une « fiche créativité » composée d'une phrase décrivant les produits (Qui, Où, Pourquoi, Quoi, Quand) et d'une représentation graphique (image, schéma, collage, etc.)

La deuxième séquence (1 heure) est une conférence plénière sur le paradigme SoSy avec tous les étudiants réunis dans une troisième salle de classe. Au cours de cet exposé, une vision historique de la succession de différentes approches de conception prenant en compte les enjeux environnementaux a été présentée traitant par exemple de « Design for Environnement », « Design for Sustainability » et de l'émergence de SoSy. En particulier, une comparaison entre soutenabilité faible et forte a été présentée [15]. A la fin de cette conférence plénière, les étudiants ont été invités à auto-évaluer leurs concepts suite à 3 questions liées à au paradigme de SoSy :

Comment votre concept est-il lié à l'aspect « milieu » ?

Comment votre concept est-il lié à l'aspect de « régénération » ?

Comment votre concept est-il lié à l'aspect « espace opérationnel sûr et juste » ?

Les étudiants ont reçu une échelle de Likert à 4 niveaux pour répondre :

1- Pas du tout lié

2- Un peu lié

3- Correctement lié

4 - En totale adéquation

Les valeurs moyennes calculées pour les projets A-F de la séquence 1 sont considérées comme les valeurs SoSy auto-évaluées pour les concepts de « conservation » « sans sensibilisation SoSy ». Les valeurs moyennes calculées pour les projets G-L de la séquence 1 sont considérées comme les valeurs SoSy auto-évaluées pour les concepts de « cuisson » « sans sensibilisation SoSy ». Lors de la troisième séquence (1 heure), les binômes A-F ont été affectés à la tâche « cuisson » et les binômes G-L ont été affectés à la tâche « conservation ». Comme pour la première séquence de conception, il leur a été demandé d'imaginer et de présenter leur concept à travers une « fiche de créativité » avec une phrase décrivant les produits et une représentation graphique. Cette fois, ils devaient prendre en compte les trois aspects clés de SoSy. Ensuite, ils ont été invités à effectuer la même auto-évaluation de leurs concepts. Les valeurs moyennes calculées pour les projets A-F de la séquence 3 sont considérées comme les valeurs SoSy auto-évaluées pour les concepts de « cuisson » « avec sensibilisation SoSy ». Les valeurs moyennes calculées pour les projets G-L de la séquence 3 sont considérées comme les valeurs SoSy auto-évaluées pour les concepts de « conservation » « avec sensibilisation SoSy ».

Concernant l'évaluation par les experts, ils ont analysé les propositions des élèves (les fiches), après l'atelier, en répondant au même questionnaire sur le niveau de SoSy.

### 3. RESULTATS ET ANALYSE

Nous allons analyser l'évaluation liée à la sensibilisation « SoSy » dans un contexte pédagogique. Concernant les résultats des auto-évaluations et des expertises SoSy entre les séquences 1 et 3 sont analysés. Globalement, les résultats d'auto-évaluation des trois concepts de soutenabilité forte ont significativement augmenté entre la séquence 1 et la séquence 3 (fig. 1). Concernant les trois aspects clés SoSy, l'auto-évaluation des binômes A-F sur l'aspect « milieu » ne montre pas d'évolution significative au cours de l'expérimentation. En revanche, pour le groupe G-L, leurs auto-évaluations augmentent significativement. Certains étudiants du groupe G-L ont exprimé qu'ils percevaient le brief « conservation » comme plus facile à appréhender que le brief « cuisson », il était donc plus facile d'appliquer les aspects SoSy sur le brief « conservation ». L'auto-évaluation de l'aspect « régénération » a augmenté au fil des séquences pour les deux groupes. Certains binômes voient leurs notes augmenter de 2 unités (A, B, G, K, L et I). Concernant le concept « espace opérationnel sûr et juste » pour les binômes A-F, quatre groupes sur six ont augmenté l'auto-évaluation. De même, pour le groupe G-L, la moitié des binômes (G, K, L) ont augmenté leur auto-évaluation et les autres ont gardé des valeurs élevées (notes entre 4 et 3). Les évaluations des experts ne montrent pas d'écart significatif entre les séquences 1 et 3 par rapport aux trois concepts SoSy. De plus, les résultats révèlent que la dernière notion « espace opérationnel sûr et juste » a diminué d'une séquence à l'autre pour le groupe A-F qui avait le brief « cuisson » lors de la troisième séquence. Ceci est cohérent avec le commentaire de l'étudiant précédemment mentionné exprimant que le brief « cuisson » est plus difficile à appréhender que le brief « conservation ».

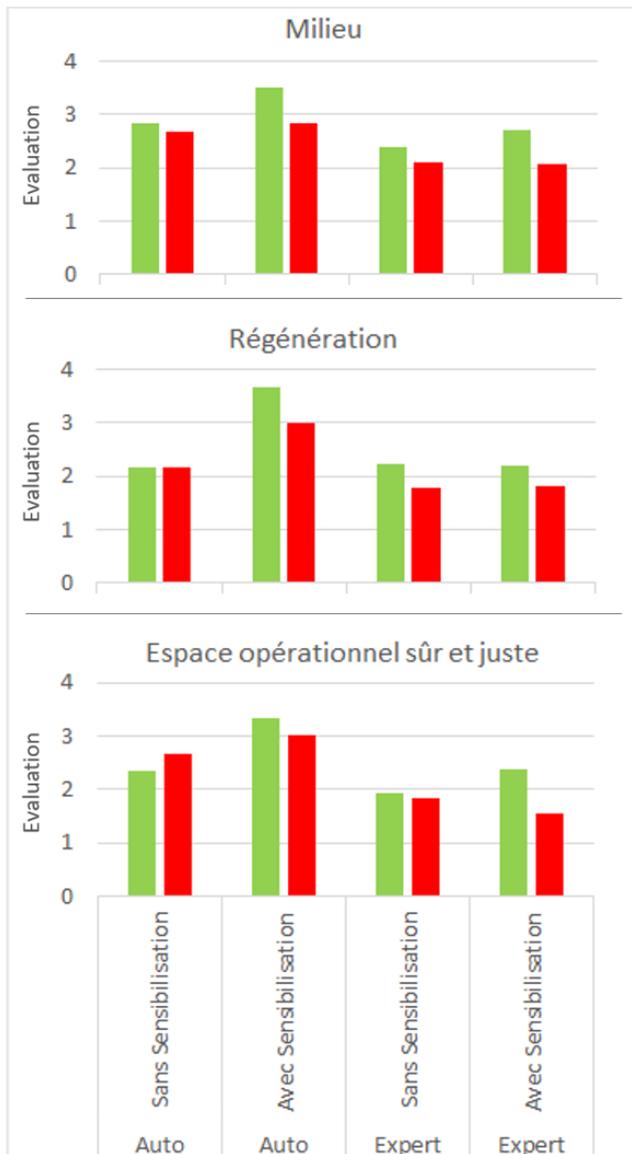


Figure 1 : Évaluation moyenne des aspects SoSy, en rouge la tâche « cuisson » et en vert la tâche « conservation » (Milieu, Régénération, Espace d'exploitation Sûr et Juste).

L'analyse de l'auto-évaluation globale (fig. 2) met en évidence une augmentation significative entre la séquence 1 et la séquence 3. Onze (A, B, D, E, F, G, H, I, J, K, L) sur les douze binômes estiment que les deuxièmes propositions prennent en considération les exigences des trois concepts de soutenabilité forte (c'est-à-dire des valeurs allant de 3 à 4). En revanche, les évaluations des experts indiquent une progression plus lente. Seuls quatre binômes (H, K, L, I) sur douze ont été mieux évalués de la séquence 1 à 3 et seuls trois binômes ont atteint des valeurs parmi 3 à 4 lors de la séquence 3. A noter que ces binômes avaient le brief « cuisson » lors de la première séquence.

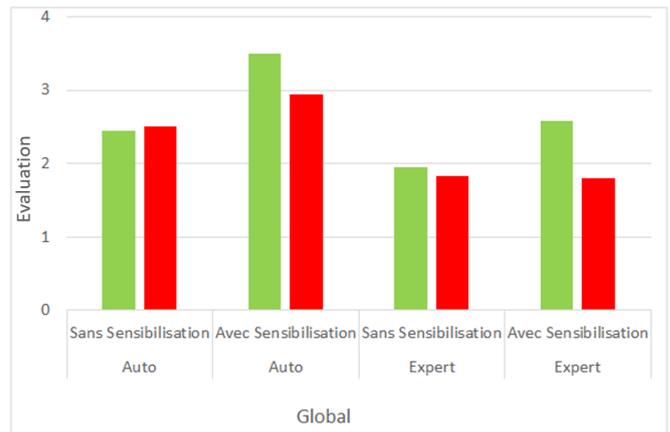


Figure 2 : Evaluation moyenne globale des aspects SoSy pour les concepts proposés pour les briefs « conservation » en vert et « cuisson » en rouge.

La figure 3 montre l'évolution des notes entre la séquence 1 et la séquence 3. Une valeur positive signifie une augmentation entre la séquence 1 et la séquence 3. Tant pour l'auto-évaluation que pour l'expertise, le concept de « régénération » présente la plus forte augmentation (fig.3). Notez également que le concept « régénération » affiche les notes les plus faibles pour l'auto-évaluation « sans sensibilisation SoSy ». Cela tend à indiquer que les étudiants n'ont pas considéré cet aspect avant le cours SoSy et l'ont trouvé suffisamment compréhensible et opérationnel pour être appliqué dans leurs projets après le cours SoSy. Du point de vue des experts, l'évaluation moyenne montre également un impact positif, mais de façon moins importante.

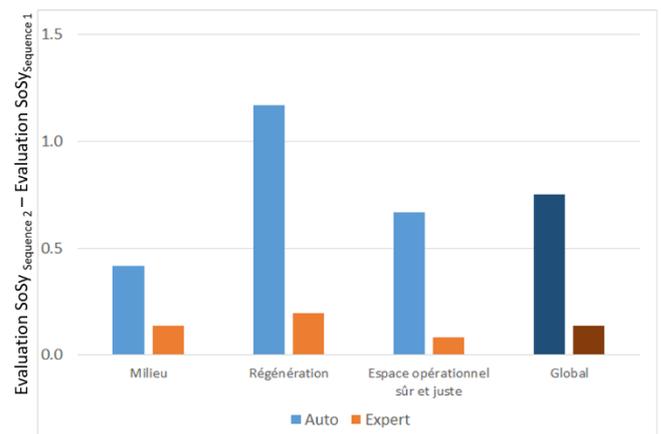


Figure 3 : Évolution de l'évaluation moyenne des aspects SoSy pour tous les concepts (une valeur positive signifie une augmentation de valeur entre la séquence 1 et la séquence 3).

## 4. CONCLUSION

L'analyse de l'auto-évaluation globale fait ressortir une progression significative entre la séquence 1 et la séquence 3. Du point de vue de l'élève, il a acquis les nouvelles connaissances et a pu les mettre en pratique. Leur auto-évaluation des trois aspects SoSy a prouvé que la « régénération » était le concept le plus facilement compris et opérationnalisable.

L'analyse de l'évaluation des experts indique une amélioration plus progressive, montrant la nécessité de recréer l'expérience avec des lignes directrices plus claires, pour le développement d'un outil de conception, où il est nécessaire non seulement de leur demander de décrire les 5 pourquoi mais aussi d'expliquer le « comment » et « pour quelle raison ». Les résultats fournissent quelques pistes pour créer un cadre prescriptif à respecter pour un Design for Strong Sustainability (DfSoSy).

En résumé, l'expérience a permis d'analyser et d'améliorer les compétences des élèves en matière de soutenabilité, malgré le fait que plusieurs changements sont nécessaires pour augmenter son efficacité pédagogique. De plus, l'observation de ce processus de créativité nous permet d'analyser et de visualiser les critères qui doivent être pris en compte pour créer un nouveau processus de conception pour un paradigme de soutenabilité forte.

## REMERCIEMENTS

Cette recherche fait partie du projet collaboratif D-TechnoSS, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-20-CE10-0006). Nous tenons également à remercier les étudiants qui ont participé à nos expériences et soutenu nos activités. Des remerciements particuliers sont adressés à Romain Guillerm, doctorant en Low-Tech pour la résilience territoriale et Charlene Bouchot, ingénieur de recherche en économie circulaire. Cette recherche contribue à l'Objectif de Développement Durable (ODD) 12 : Consommation et production responsables.

## REFERENCES

- [1] Brown, T., & Katz, B. (2011). "Changer par conception. Le journal de la gestion de l'innovation produit" 28(3), 381-383.
- [2] Bocken, Nancy M.P., Short, S.W., Rana, P., & Evans, S. (2014). "A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes". *Journal of Cleaner Production* 65, 42-56.n
- [3] Costanza, R., & Daly, HE (1992). « Capital naturel et développement durable ». *Biologie de la conservation* , 6 (1), 37-46. <http://www.jstor.org/stable/2385849>
- [4] Daly HE (1999a) *Économie au-delà de la croissance : économie plus durable* . développement . Pustet , Salzbourg
- [5] Ott K (2009) « Sur la justification de la conception de la durabilité forte ». Dans : Döring R ( ed ) *Durabilité, capital naturel et conservation de la nature*. Metropolis, Marbourg, pp 49-72
- [6] Chaminade, (2020) « Innover pour quoi? Déballer le rôle de l'innovation pour une durabilité faible et forte ». (2020). *Journal de recherche sur la durabilité* , 2(1). doi : 10.20900/jsr20200007.
- [7] Ott, K. (2003). « Les arguments en faveur d'une durabilité forte ». *L'éthique environnementale de Greifswald*, 59-64.
- [8] Ott K, Döring R (2008) « Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit » 2e édition, Metropolis, Marburg
- [9] Wu, J. (2013). Science de la durabilité du paysage : services écosystémiques et bien-être humain dans des paysages changeants. *Écologie du paysage* , 28(6), 999-1023
- [10] Robèrt, K. H. (2000). Tools and concepts for sustainable development, how do they relate to a general framework for sustainable development, and to each other?. *Journal of cleaner production*, 8(3), 243-254.
- [11] Turner, RK et Pearce, DW (1993). Développement économique durable : principes économiques et éthiques. Dans *Economie et écologie* (pp. 177-194). Springer, Dordrecht.
- [12] Reed, B. (2007). Passer de la « durabilité » à la régénération. *Recherche et information sur le bâtiment* , 35 (6), 674-680.
- [13] Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, SE, Fetzer, I., Bennett, E.M. , ... En ligne Sörlin, S. (2015). Limites planétaires : guider le développement humain sur une planète en mutation. *Sciences*, 347 (6223), 1259855
- [14] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, FS, Lambin, EF, ... & Foley, JA (2009). Un espace d'exploitation sûr pour l'humanité. *Nature* , 461 (7263), 472-475.
- [15] Raworth, K. (2012). "A safe and just space for humanity: Can we live within the doughnut?" Oxfam Discussion Paper.
- [15] Hedenus, F., Persson, M., & Sprei, F. (2015) *History, Definition & The Role of the Engineer*. Gothenburg

# Accompagner une structure territoriale dans sa transition vers la durabilité, proposition d'une architecture méthodologique

R. Allais <sup>a,\*</sup>, F. Vallet<sup>b,c</sup>, J. Gobert<sup>d</sup>

<sup>a</sup> APESA, Pôle de Coopération, 23 Rue Hélène BOUCHER, 40220 Tarnos

<sup>b</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire Génie Industriel, 3 rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

<sup>c</sup> IRT SystemX, Paris-Saclay, Avenue de la Vauve, 91127 Palaiseau, France

<sup>d</sup> Ecole des Ponts, LEESU, Univ Paris Est Creteil, Marne-la-Vallée

\* e-mail : romain.allais@apesa.fr

## 1. INTRODUCTION

Il n'est aujourd'hui plus nécessaire de revenir sur les limites des modèles de développement en termes de durabilité (e.g. limites planétaire, accroissement des inégalités) [1-3], sur la nécessité de réviser en profondeur les paradigmes actuels (*"The sustainability problems facing our society are persistent and will only be resolved by structural systemic changes in terms of technology, economy, culture, ecology, institutions and organization: a transition."* [4] et le rôle important que la conception peut (et/ou) doit prendre pour accompagner l'innovation systémique et les transitions vers la durabilité [5, 6].

Les travaux présentés ici s'inscrivent dans la continuité des travaux sur la méthode 5D-STM (5 Dimensions Sustainability Transition Method) [7, 8] et la grille d'analyse spatio-temporelle des projets territoriaux [9] comme moyens à mettre en œuvre pour accompagner la conception d'écosystèmes territorialisés durables. Ils s'inscrivent dans le cadre du projet PIANO, projet lauréat de l'AMI innovation sociale de la région Nouvelle-Aquitaine (2020-2022), réalisé dans le secteur de l'économie sociale et solidaire (ESS) et plus particulièrement celui de la culture.

L'objet d'étude est un lieu de diffusion de musiques actuelles, le Magneto, géré par l'association la Locomotive qui en assure le projet artistique et culturel. Ce lieu culturel est considéré ici comme une structure inscrite sur un territoire. La proposition développée pour accompagner ce type de structures dans leur transition s'appuie à la fois sur l'histoire et les tendances (le passé), une compréhension fine des modalités de fonctionnement du système (le présent) et propose des

pistes pour atteindre un idéal défini par les parties prenantes du lieu (le futur) (Fig. 1, page suivante).

Nous reviendrons principalement dans cet article sur l'architecture méthodologique mise en place pour répondre à la démarche de transition vers la durabilité d'un lieu de musique actuelle et illustrerons la démarche par quelques résultats.

## 2. ARCHITECTURE METHODOLOGIQUE ET OUTILS

Cette architecture méthodologique se décompose en 3 grandes fonctions détaillées dans cette première partie.

1. Comprendre le présent et s'appuyer sur les pratiques
2. Imaginer collectivement la place de la structure dans un écosystème durable
3. Dessiner et opérationnaliser la trajectoire du changement.

### 2.1. Comprendre le présent et s'appuyer sur les pratiques

Au cœur de cette partie se trouve le modèle d'analyse spatio-temporel des projets territoriaux [9]. Ce modèle d'analyse permet de cartographier les réseaux de parties prenantes et les ressources qu'ils mobilisent à travers leurs participations aux activités de la structure étudiée (ici, Le Magneto). Ces ressources peuvent être matérielles (ex. équipements de sonorisation) ou immatérielles (ex. compétences en enseignement), présentes à l'échelle individuelle ou territoriale (ex. culture basque, lieu de diffusion). Elles sont portées par des individus, des organisations économiques, citoyennes ou publiques.

Pour alimenter ce modèle d'analyse et déterminer les ressources utilisées ou manquantes, plusieurs temps

d'analyse ont été mis en place. D'abord ont été réalisées une étude préliminaire basée sur des entretiens avec les salariés de la structure (4 salariés) et une étude documentaire (rapports d'activité, fiches de poste) pour se familiariser avec les processus et l'organisation interne et esquisser une première liste des parties prenantes de la structure. Dans un second temps, 11 entretiens semi-directifs ont été réalisés avec les parties prenantes de la structure pour comprendre finement quels types de relations chaque entité entretient avec la structure et faire émerger des attentes et problématiques. Le troisième temps a permis d'affiner ces problématiques à travers un entretien collectif (focus group) réalisé avec les

usagers de la salle (5 participants), une enquête réalisée auprès des salariés et un atelier collectif basé sur une méthode d'idéation en grand groupe centrée sur les usages, la Roue de Margolis [10, 11] (17 participants).

Les éléments repérés par une étoile sont des outils ayant permis à la fois de comprendre les modalités d'organisation de l'écosystème territorial autour du Magneto, de mettre à jour certaines tensions quant aux représentations que les différentes parties prenantes se faisaient du lieu et ont permis de formaliser des attentes vis-à-vis du devenir du lieu et initier ainsi la seconde phase, de prospective.

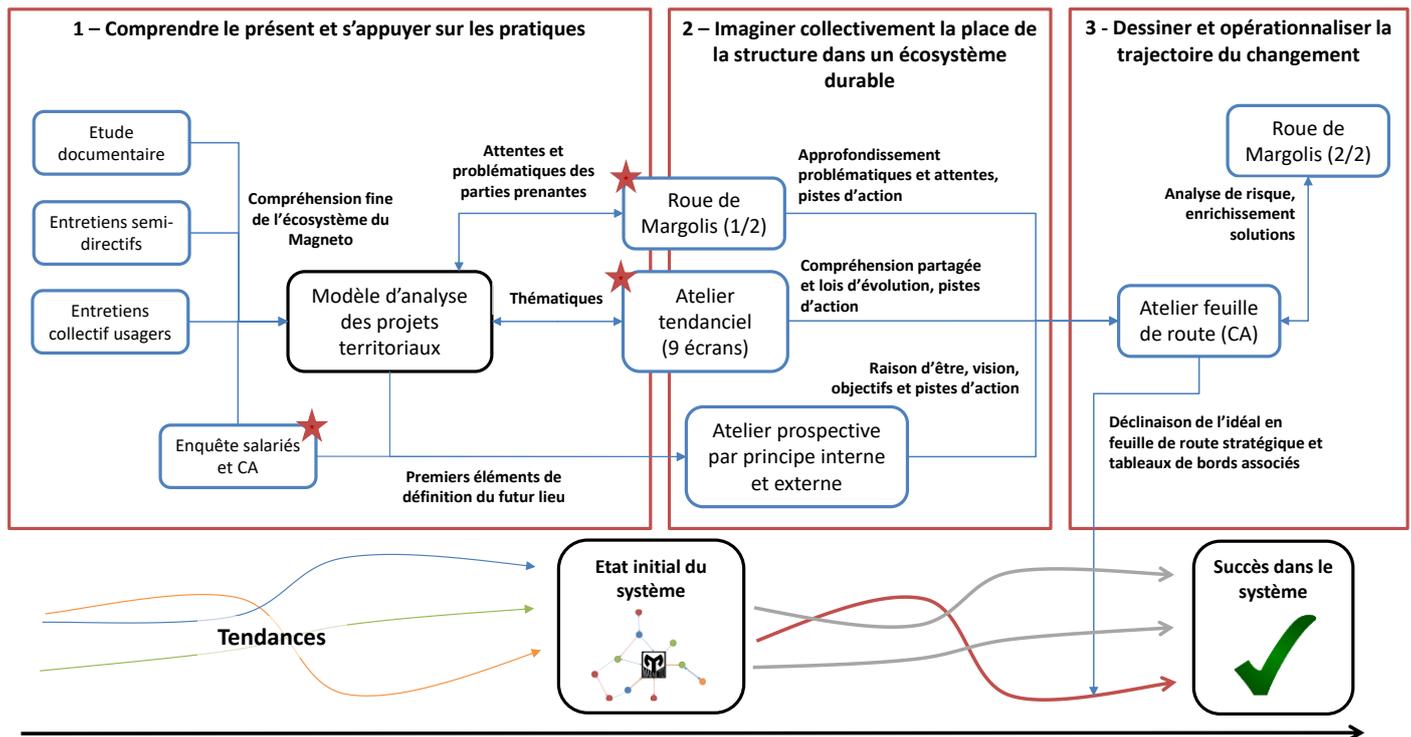


Figure 1 - Architecture méthodologique complète du projet PIANO

## 2.2. Imaginer collectivement la place de la structure dans un écosystème durable

Cette seconde partie s'est appuyée sur les résultats du diagnostic autant qu'elle y a contribué. En effet, les trois thématiques issues de la première partie ont été traitées dans six ateliers de prospective.

Les 3 premiers ateliers thématiques ont utilisé l'outil 9 écrans [12] basé sur une approche par les tendances considérant différents niveaux systémiques {sous-système / système / super-système}. Ces mêmes thématiques ont ensuite été traitées lors d'ateliers de prospective par principes (atelier WTFuture ??) basé sur la Framework for Strategic Sustainable Development [8, 13-16] et ses principes de durabilité concernant les dimensions de développement Humain, de limites écologiques et de gouvernance (dimension politique et gestionnaire). Il est à noter que les principes de gouvernance n'ont pas été mobilisés dans le cadre du projet PIANO.

Cette seconde phase a permis aux participants de questionner et d'approfondir les attentes et problématiques issues de la phase d'analyse pour ensuite proposer des pistes de solution structurées.

## 2.3. Dessiner et opérationnaliser la trajectoire du changement

Suite aux travaux collectifs et à leur traitement, les données sont soumises aux décideurs (le conseil d'administration et la direction de l'association) pour sélectionner ou s'inspirer des propositions et les hiérarchiser selon le système de valeur (cf. résultats atelier WTFuture ??) puis créer des feuilles de route stratégiques ad hoc. Un deuxième atelier roue de Margolis a vocation à discuter et amender les propositions des décideurs (lors d'une session ouverte aux parties prenantes externes).

Une fois les objectifs et feuilles de routes stratégiques validées, il s'agissait d'engager avec les parties prenantes concernées et d'organiser des groupes de travail thématiques. Ces groupes devaient construire à leur tour,

des feuilles de routes thématiques plus opérationnelles venant alimenter la feuille de route stratégique. Des tableaux de bord devaient assurer le pilotage du déploiement de ces feuilles de route.

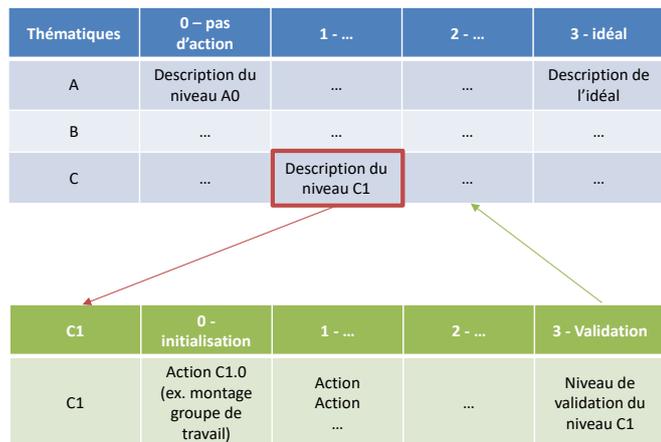


Figure 2 - Agencement des feuilles de routes stratégiques et thématiques

Pour cette partie déploiement et pilotage, nous nous sommes inspirés des travaux issus du projet Convergence [17] et la méthodologie des grilles de maturité [8].

### 3. RESULTATS

Nous présentons ici quelques enseignements, à titre d'exemple, issus des résultats obtenus par la mise en œuvre de l'architecture méthodologique.

#### 3.1. Sur l'organisation et les parties prenantes

Sur la base des études documentaires (bilans d'activité, entretiens préliminaires et fiches de poste), les flux décisionnels et principales activités et les parties prenantes directes internes et externes ont été recensées. De plus, cette étude préliminaire a fait émerger plusieurs points dont une structuration autour de compétences et ressources-clefs au service des activités de programmation (activité clef du Magneto), de formation, et d'accompagnement. Ainsi, la Locomotive et le Magneto reposent sur un socle de ressources que sont les ressources humaines (i.e. rôle central du dirigeant et relation de confiance avec le CA; la commission programmation (expertise et relation) et les salariés et bénévoles qui sont engagés et fidèles). D'autres ressources immatérielles sont importantes pour la structure : la ressource organisationnelle qui se décline au travers des ressources relationnelles importantes qui se sont développées dans le temps grâce à la participation à de nombreux réseaux musique actuelle ou d'ESS (Economie Sociale et Solidaire). Cette ressource organisationnelle est aussi tangible au travers du travail de mutualisation des compétences, la réflexion sur la programmation via le réseau local de musique actuelle (Atabal, Microscope...) ou des partenaires plus lointains géographiquement (Bordeaux, Pau...).

Des relations partenariales fortes et fidèles porteuses de compétences avec le RIM par exemple (réseau régional

des indépendants de la musique qui propose une veille légale sur les contrats, la formalisation de convention de recrutement volontaire en services civiques), des « parrains » (e.g. La rockschool Barbey, à Bordeaux) ou partenaires historiques (e.g. Ville de Tarnos) qui agissent en proximité et en confiance. On peut également noter une certaine intégration dans la stratégie culturelle de la ville de Bayonne avec d'autres acteurs de la culture locaux (le cabaret la Luna Negra, le cinéma l'Atalante et le centre d'art Space Junk).

#### 3.2. Sur les représentations autour de la Locomotive et du Magneto

Les différentes parties prenantes sollicitées pendant ce projet ont des représentations parfois convergentes (ex. appartenance à l'ESS) et parfois divergentes (ex. place du rock basque dans la programmation) (Figure 3).

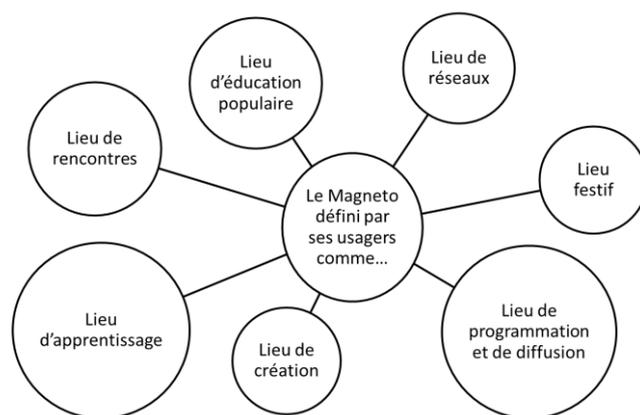


Figure 3 - Des représentations variées pour un lieu unique

Chaque tension, ainsi identifiée, crée des espaces de discussion pour l'évolution du système et peut être traitée lors des ateliers collectifs. Par exemple, il ressort une forte volonté d'ouverture à la participation des parties prenantes externes (adhérents, habitants...), de devenir centre de ressource pour des projets culturels citoyens. Cette orientation vient en opposition avec une ressource-clefs du lieu actuel, la programmation perçue comme « pointue » et experte. Il en est de même avec les résultats de l'atelier Roue de Margolis où sont ressorties deux tendances fortes. D'une part, la rénovation du lieu fait naître une crainte de perte de l'esprit du lieu et d'autre part, cette rénovation crée des opportunités d'évolution pour les activités et missions de ce lieu.

Autre point notable, la question du niveau d'intervention et du périmètre d'action est systématiquement posée (Magneto, Locomotive, réseau local ou régional des musiques actuelles, réseau régional ou au-delà ?). Il apparaît donc nécessaire d'aborder cette question de périmètre pertinent pour l'action dans les ateliers thématiques.

#### 3.3. Sur l'ancrage territorial du lieu

L'analyse par la mobilisation des ressources matérielles, immatérielles et territoriales a fait ressortir un ancrage du lieu important par son emplacement en cœur de ville, dans un patrimoine historique (rempart

Vauban de Bayonne). Le lieu est identifié comme un espace « alternatif », relié à d'autres espaces reconnus comme tels sur le territoire. Ainsi, les publics et usagers du lieu le fréquentent tant pour la qualité de sa programmation que pour l'effet de reconnaissance des « alternatifs » entre eux. Le Magneto est également un lieu qui contribue au développement économique de proximité en privilégiant le local tant pour la restauration et le bar que pour le soutien de la scène émergente locale. Toutefois, ce lieu se positionne également comme promoteur de groupes d'envergure locale à l'international à travers sa programmation « éclectique et pointue ».

L'ancrage territorial s'exprime également à travers une histoire partagée avec les acteurs locaux (collectivités ou usagers). Cette histoire a été retracée à travers les entretiens et l'atelier 9 écrans qui a également permis de mettre en avant, dans différentes temporalités, les ressources-clefs de la structure dont voici quelques exemples :

- Au commencement : les 4 Fantastiques. Collectif ad hoc pour promouvoir les musiques actuelles ; Défiance de la ville et gêne pour les riverains [...] Les bars du Petit Bayonne sont des partenaires-clefs
- Un lieu en commun : Le Magneto. Ouverture du Magneto, lieu reconnu de diffusion des musiques actuelles en complémentarité avec les autres lieux du BAB [...] ; Fusion des structures pour la gestion professionnelle de la salle par l'association la Locomotive à la demande de la mairie
- Une bifurcation : la professionnalisation. CA représentatif de l'histoire des 4 Fantastiques, cooptation selon les compétences [...]
- Tendance à la diversification des activités. Diversification des offres [...] Recherche de moindre dépendance aux fonds publics [...]
- Nouveau lieu, nouveaux usagers ? Lieu qui se veut ouvert et accessible (politique tarifaire) mais fréquenté principalement par les habitués (quelle mixité ?) [...] Cooptation et attention particulière à l'ambiance et au bien-être des salariés et bénévoles mais situations parfois mal vécues
- Une constante : le support des collectivités. Fidélité et confiance des collectivités locales dans les activités de la Locomotive [...] Manque de reconnaissance à un échelon départemental.

### 3.4. Autour de la raison d'être du Magneto

L'atelier WTFuture ?! a permis aux participants de penser le Magneto au prisme des principes de durabilité développés dans la FSSD [8, 13-16] et de décrire, de manière qualitative, (1) la raison d'être et les missions de la structure ; (2) les contributions et dégradations pour chacun des principes et (3) de générer à la fois des problématiques et des pistes de résolution.

D'après les participants aux ateliers, la raison d'être se trouve au croisement entre un support à la création de lien social (e.g. « lieu de création de lien par la musique ») et d'émancipation citoyenne (i.e. « un lieu d'émancipation culturelle, sociale et sociétale ») soutenue par les

principes de COMPETENCE et de SENS, qui ressortent comme des principes directeurs pour l'organisation au même titre que le volet émotionnel du principe d'INTEGRITE. En effet, l'intégrité émotionnelle a été considéré comme une raison d'être de la structure (i.e. « créer et partager des émotions »). Les participants ont également décrit les domaines de responsabilité de la structure parmi lesquels on retrouve les dimensions écologiques (e.g. transport, déchets), la dimension de prévention des risques liés à la vie nocturne (e.g. bruits, alcool, violences sexistes...) ou encore l'accessibilité à l'offre (e.g. médiation culturelle, accessibilité prix) ou handicap) (Tableau 1).

**Tableau 1 - Une redéfinition des hiérarchies entre missions, systèmes de principes directeurs et domaines de responsabilité**

Mission et raison d'être	Système de principes directeurs	Domaines de responsabilité
<b>Emancipation citoyenne &amp; lien social par la musique</b>	<b>Sens</b> - Donner envie, réunir autour d'une passion commune	<b>Impartialité</b> Ouverture au plus grand nombre et médiation culturelle
	<b>Compétence</b> - Autonomisation dans la pratique instrumentale et former des citoyens	<b>Consommation matière non renouvelables, émissions et déchets</b> - Limiter les impacts environnementaux des activités
	<b>Influence</b> - Donner les moyens aux usagers de participer (à l'apprentissage, à la cité)	
	<b>Intégrité émotionnelle</b> - Créer et partager des émotions	<b>Intégrité physique et mentale</b> - Prévention des pratiques à risque

Au cours des séances, les participants ont formalisé 6 problématiques qui ont pu être discutées collectivement : 1/ Quelle adhésion aux valeurs et au projet de la Locomotive ? 2/Comment améliorer la participation des élèves et parents d'élèves à la vie de l'association ? 3/Comment rassurer les bénévoles dans leur engagement ? 4/ Comment conserver et valoriser la pédagogie spécifique à la rockschool ? 5/ Comment valoriser ces compétences 'accompagnement', 'organisation' et 'production' ? 6/ Quelles responsabilités pour la structure ? divisé en 6.1/ Comment limiter l'empreinte environnementale du lieu et de ses activités ? et 6.2/ Comment préserver l'intégrité des usagers ?

Revenons aux réponses proposées par les participants concernant la seconde problématique. Les élèves, bien qu'acteurs de leur formation musicale, sont toutefois perçus comme « consommateurs » de l'offre de la rockschool. Cette problématique se retrouve souvent dans les structures associatives et qui pose une question sensible pour les structures d'éducation populaire, qui fondent leur principe sur l'émancipation et la participation active des citoyen.nes au projet. L'enjeu ici est de donner du SENS aux élèves au-delà de l'apprentissage de la musique, une fierté d'appartenir à la Locomotive.

Un idéal, défini par les participants, serait que les élèves, en plus de participer à leur programme

# Cartographie des projets d'économie circulaire : étude de cas dans une entreprise de l'industrie sportive

N.S. Rohsig Lopez <sup>a,\*</sup>, J. Legardeur <sup>a</sup>, J. Faucheu <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Univ. Bordeaux, ESTIA Institute of Technology, F-64210, Bidart, France

<sup>b</sup> Mines Saint-Etienne, Univ Lyon, CNRS, UMR 5307 LGF, F-42023 Saint-Etienne, France

\* e-mail : nicole.rohsig@estia.fr

## 1. INTRODUCTION

L'industrie du sport en France intègre 112.000 entreprises qui ensemble représentent un revenu annuel de 77.7 milliards d'euros [1]. Les particuliers sont les principaux clients de ce secteur via leurs achats de produits tels que les chaussures, équipements et vêtements et via des services d'abonnement et les frais de séances de pratique [2]. Néanmoins, il y a un nouveau défi pour l'industrie du sport : le changement climatique, qui présente de nombreux risques et conséquences concernant les pratiquants sportifs comme par exemple le stress thermique, le stress respiratoire (lié aux pollutions aux particules fines, les incendies de forêt), l'augmentation des risques de cancers (notamment de la peau...) [3]. En outre, les terrains de jeu pour la pratique des sports (notamment d'hiver) sont aussi dégradés. Cependant, en même temps que l'industrie du sport est une victime du changement climatique, elle est aussi un contributeur ; l'impact annuel moyen d'un adulte sportif est de 844 kg de carbone équivalent [4].

Dans ce contexte, il faut repenser la manière de pratiquer les sports, mais aussi l'ensemble de l'industrie et notamment la façon dont les produits sportifs sont conçus. Aujourd'hui, la plupart des produits sont conçus dans une logique linéaire d'extraction, production, consommation et déchet. L'économie circulaire (EC) émerge comme une alternative qui propose l'instauration d'un système restauratif basé sur l'utilisation d'énergies renouvelables, la minimisation des impacts et l'élimination des composants chimiques toxiques, et l'éradication de tout déchet grâce au design [5]. Ainsi, la question suivante oriente cet article : comment une entreprise de l'industrie du sport peut s'engager dans l'EC ? Cet article concerne donc une étude de terrain réalisée dans le premier semestre de 2022 focalisée sur une grande entreprise internationale qui conçoit et distribue des produits sportifs à travers le monde et qui fait actuellement sa

transition vers la circularité. L'objectif est de cartographier les principales boucles de circularité utilisées dans les différentes initiatives de l'entreprise au niveau européen. Cet article est divisé en cinq sections. Dans l'introduction, la pertinence et l'objectif de l'étude de l'EC dans l'industrie du sport sont présentés. Ensuite, dans la deuxième section, nous présentons une synthèse de la recherche bibliographique avec une nomenclature utilisée pour les différentes stratégies circulaires. Dans la troisième section, nous exposons la méthodologie utilisée pour le processus d'exploration et de classification des projets circulaires de l'entreprise sportive, ainsi que la démarche d'entretiens avec des représentants des projets. Les résultats sont exposés dans la quatrième section avec une analyse de la répartition des projets dans chaque stratégie circulaire et une analyse des motivations et des challenges pour l'implémentation de ces projets. Finalement, dans la conclusion, une synthèse des résultats est proposée avec une revue critique des limitations rencontrées et perspectives pour les projets futurs.

## 2. BIBLIOGRAPHIE

Plutôt qu'une origine ou un créateur unique, le concept d'EC a eu plusieurs contributeurs : le professeur américain John Lyle, son élève William McDonough, le chimiste allemand Michael Braungart et l'architecte et économiste Walter Stahel [6]. Dans ce contexte, le concept de « cradle-to-cradle » (C2C) propose la conception d'un système éco-efficace au long de tous les cycles de vie dans un système industriel circulaire, où la société peut utiliser les matériaux indéfiniment avec l'objectif final du progrès écologique et économique [7]. La Fondation Ellen MacArthur [5] a représenté un modèle d'EC (Butterfly model) qui est régulièrement utilisé actuellement [8] : l'EC est un système industriel qui est restaurateur ou régénératif par intention et par conception. Il remplace le concept de « fin de vie » par la restauration, s'oriente vers l'utilisation d'énergies renouvelables, élimine l'utilisation de produits chimiques toxiques, qui nuisent à la réutilisation, et vise l'élimination des déchets grâce à la

conception supérieure des matériaux, produits, systèmes et modèles commerciaux.

Une EC réussie doit contribuer aussi aux trois dimensions du développement durable [9], à savoir les facteurs sociaux, économiques et environnementaux. Cependant, seulement 13 % des définitions de CE qui ont été analysées faisaient référence aux trois dimensions, ce qui est problématique car cela peut aboutir à un système qui n'est pas durable [8]. Alors que 46 % des définitions affirment que l'objectif de l'EC est la prospérité économique, suivis de 37 % des définitions qui disent qu'il s'agit de l'égalité environnementale, on constate que l'équité sociale est souvent négligée [8].

Afin de construire un cadre d'analyse et de classification des projets d'EC de l'entreprise étudié, nous avons étudié les classifications de stratégies circulaires existantes dans l'état de l'art. Tout d'abord, les niveaux de la Directive Européenne de Hiérarchie de Déchets (prévention, réutilisation, recyclage, récupération et rejet) ont été premièrement intégrés. Ensuite, nous avons basé nos travaux sur les boucles concentriques du diagramme papillon (Butterfly Diagram) du modèle proposé par la Fondation Ellen Mac Arthur [5] avec un intérêt également sur l'approche d'analyse selon le niveau de dégradation de la matière [10]. Cette analyse est encadrée par l'idée que le design pour la durabilité a évolué d'un focus technique centré sur le produit vers des systèmes de large échelle dans lequel la durabilité est un défi socio-technique. Ainsi, dans cet article, les solutions développées par l'entreprise seront analysées au niveau des produits/services proposés, mais aussi au niveau du modèle économique (business modèle). Dans ce but, il est intéressant de caractériser les différentes stratégies des boucles de circularité proposées par le Butterfly Diagram [5] et leurs modèles de business circulaires correspondants qui sont détaillés ci-après :

- **Réparation et maintenance** : où l'enjeu est le prolongement de la durée de vie grâce à la réparation et la maintenance afin de permettre un usage et une fonctionnalité pour le plus de temps possible [7]. Cela demande de construire une offre supérieure de l'expérience utilisateur avec le produit en visant un engagement des clients dans la cocréation de la valeur au lieu de juste cibler la vente de produits [11].
- **Partage [économie de la fonctionnalité]** : l'objectif est de développer des produits durables qui peuvent être partagés entre différents usagers qui ont accès au service, diminuant la demande de production de nouveaux produits [7]. Cela privilégie l'accès à l'usage plutôt que la propriété, avec des promesses d'une meilleure utilisation des ressources [12]. Selon certains chercheurs, l'économie de la fonctionnalité est une sous-catégorie de l'EC [13].
- **Réutilisation et redistribution** : avec l'enjeu de viser le ré-usage des produits de multiple fois avec des interventions mineurs [7,11]. Ce modèle d'affaires circulaire est basé dans l'accès aux

produits d'occasion avec des valeurs de marché inférieures aux prix des produits neufs.

- **Reconditionnement et remanufacture (remise à neuf)** : basé sur des processus qui combinent des objectifs de réutilisation/redistribution avec des étapes de réparation/maintenance [11]. La différence entre reconditionnement et la mise à neuf est le niveau d'intervention : le reconditionnement est plutôt cosmétique avec de petites réparations, la remise à neuf est plus profonde, impliquant le désassemblage, le nettoyage, la vérification de conformité et le remplacement de pièces usées [11]. La valeur réside dans l'accès aux biens d'occasion avec la même qualité des produits neufs et qui est garantie par l'intervention et la certification du fabricant [11].
- **Upcycling** : processus dans lequel les produits et les matériaux usés sont transformés en nouveaux produits selon deux approches [10] : (i) redéfinition, quand la fonctionnalité change, mais la forme reste la même ; et (ii) refonctionnalité, quand il y a un changement partiel de la forme pour répondre à une nouvelle fonction.
- **Downcycling** : conversion de produits en matériaux avec une plus faible valeur ajoutée, normalement dans une logique de boucle ouverte avec une perte significative de la valeur de la matière originale.
- **Recyclage** : processus pour revenir à l'état de matière primaire [7] en maintenant les propriétés de base de la matière malgré la perte partielle de qualité.

### 3. MÉTHODOLOGIE

Dans cette étude, une entreprise majeure de l'industrie du sport spécialisée dans la conception et la distribution d'articles sportifs a été analysée. Cette entreprise a plus de 1700 magasins et plus de 100.000 employés dans le monde. En thèse CIFRE au sein de l'entreprise, nous avons pu accéder aux différents projets d'EC en cours par l'équipe de développement durable de l'entreprise qui a fourni les contacts de 17 projets circulaires, 40 autres projets ont été trouvés dans les médias de l'entreprise (réseaux sociaux, site internet), 59 autres projets ont été recommandés par les représentants de projets mentionnés antérieurement, et finalement 38 projets ont été trouvés directement avec l'équipe de ventes qui développe des projets d'économie de fonctionnalité. Au total, c'est 154 projets d'EC en cours qui ont été identifiés et contactés.

Suivant la classification des boucles circulaires présentée précédemment dans la bibliographie, les projets de l'entreprise ont été classés selon ces différentes boucles d'EC. Certaines approches semblaient récurrentes et parfois différentes dans les pratiques utilisées. Un autre niveau de granularité a donc été rajouté, en créant des sous-catégories appelées « approches ». Par exemple, pour les stratégies de réparation et de maintenance, il y a des approches suivantes qui peuvent être utilisées : ateliers

professionnels, kits de réparation en Do It Yourself (DIY), tutoriels et vidéos DIY, mise à disposition de pièces détachées et éco-conception pour la réparation. Dans le Tableau 1, nous avons synthétisé les différentes boucles circulaires et leurs approches correspondantes.

**Tableau 1 – Boucles circulaires et leurs approches**

Boucle circulaire	Approche
1. Réutilisation et redistribution	Réutilisation avec reprise en magasin (1.a)
	Réutilisation avec reprise en ligne (1. b)
	Atelier professionnel (1.c)
2. Réparation et maintenance	Vidéos DIY (2.a)
	Kit DIY (2.b)
	Pièces détachées (2.c)
3. Reconditionnement et remise à neuf	Eco-conception pour la réparation (2.d)
	Seconde vie avec reconditionnement et reprise en magasin (3.a)
	Seconde vie avec reconditionnement et reprise en ligne (3.b)
	Remanufacture (3.c)
	Location courte durée - un seul produit (4.a)
4. Partage (économie de la fonctionnalité)	Location courte durée - pack de produits (4.b)
	Abonnement - un seul produit (4.c)
	Abonnement évolutif (4.d)
	Abonnement multisport [4.e]
	Leasing (4.f)
	Redéfinition (5.a)
5. Upcycling	Upcycling stylistique (5.b)
	Refonctionnalité (5.c)
	Réutilisation de pièces détachées (5.d)
6. Recyclage	Recyclage de produits existants (6.a)
	Eco-conception pour le recyclage (6.b)
7. Downcycling	Downcycling de produits existants (7.a)

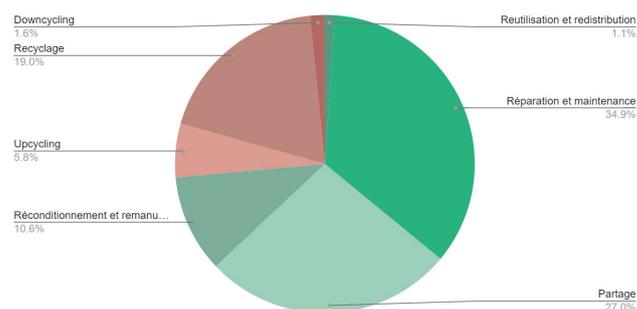
Un entretien avec les représentants de 33 projets circulaires a été conduit. Les personnes interrogées ont été choisies en fonction de leur lien avec les projets circulaires. Il y avait 14 personnes interrogées issues du développement produit, 8 de la distribution, 7 des process industriels et 4 des équipes supports (laboratoires d'innovation et direction du développement durable). Les questions visaient à comprendre leurs objectifs, défis, motivations et perception de l'EC dans leur secteur.

## 4. Résultats et discussion

Dans cette section, les résultats de la recherche sont présentés et discutés. Cela comprend la classification des projets circulaires et l'analyse d'entretiens avec les représentants de ces initiatives.

### 4.1. Classification des projets circulaires

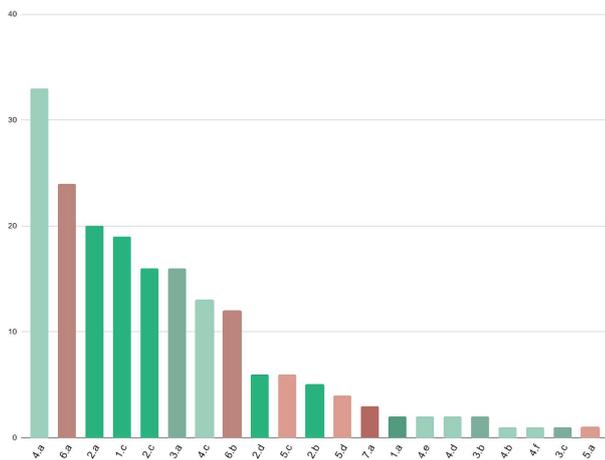
Les 154 projets circulaires trouvés concernaient 89 natures de produit différentes. Avec leur description, nous les avons classées selon les boucles circulaires et leurs approches. Un projet peut inclure simultanément plusieurs approches, généralement sur la même boucle circulaire. Par exemple, les projets de réparation de vélo peuvent s'appuyer sur des ateliers professionnels, mais aussi sur des vidéos DIY, des kits de réparation et des pièces détachées. Également, d'autres projets peuvent combiner différentes stratégies circulaires. Par exemple, il existe un projet de fin de vie pour les tentes dans lequel certains composants sont recyclés tandis que d'autres pièces passent par un processus d'upcycling. Dans la Figure 1, le graphique présente la répartition de projets selon les boucles de circularité.



**Figure 1 - Classification des 154 projets identifiés selon les boucles de circularité**

Nous pouvons noter que la stratégie "Réparation & maintenance" est la boucle la plus utilisée, représentant 34,9% des projets. Ensuite, en deuxième position, il y a le partage - économie de fonctionnalité - (27,0%), suivi du recyclage (19,0%). Il y a un équilibre entre eux, montrant que cette entreprise explore simultanément différentes boucles circulaires. La réparation et la maintenance est la boucle la plus représentée, car la plupart des projets sont déjà en phase de mise en œuvre sur le marché, ouvrant la voie à de nouveaux projets de réparation et de maintenance avec des orientations et une méthodologie claires.

Puis, nous avons classifié ces projets avec un niveau d'analyse plus fin, selon les approches qui composent chaque boucle (Figure 2).



**Figure 3 - Occurrence des approches composant les différentes boucles circulaires**

Nous pouvons noter que la location à courte durée d'un produit est l'approche la plus courante avec 34 projets qui représentent 17,46 % de toutes les approches circulaires. Il s'agit généralement d'une initiative des magasins organisée de façon indépendante, plutôt qu'une action unifiée au niveau global de l'entreprise. Ainsi, ils ont une plus grande représentation par rapport aux autres projets, étant liée au nombre de magasins (plus de 1050 en Europe) mais ils ont moins d'impact de transformation de l'organisation vers la circularité car menés localement sans se connecter avec la stratégie générale de l'entreprise, ayant ainsi une capacité réduite d'action. La location à courte durée est habituellement employée dans des magasins à proximité des sites de pratique (par exemple, des skis à proximité des stations de montagne) à des saisons spécifiques. Par rapport à d'autres approches, la location courte durée est déjà commune dans l'industrie du sport et sa mise en œuvre est donc rapide. A contrario, nous pouvons noter que des approches comme l'abonnement multisport est moins représenté car nécessite une évolution plus importante concernant l'expérience utilisateur; la stratégie d'information et la logistique qui demande des efforts unifiés de plusieurs services au sein de l'entreprise.

Par rapport à la stratégie de réparation & maintenance, la vidéo DIY est l'approche la plus utilisée avec une vingtaine de projets qui le proposent. Quant aux ateliers professionnels, ils sont un peu moins représentés, avec dix-neuf projets. Les solutions de réparation DIY sont moins chères pour les clients et nécessitent moins de ressources (par exemple, des techniciens formés). De plus, le DIY a été principalement mis en œuvre pour les équipements de protection individuelle, car la réparation professionnelle nécessite une ré-homologation du produit qui peut nécessiter des tests destructifs. Les motivations et les barrières à la réparation sont liées à des aspects techniques, émotionnels et de valeur; et donc il est fondamental d'explorer la relation entre l'utilisateur et le produit [14]. Dans ce contexte, les Repair Cafés constituent des partenaires potentiels pour les entreprises de conception et production notamment de produits sportifs. Par exemple, dans une optique de favoriser les réparations de type DIY, il est souhaitable que l'entreprise conçoit des produits plus faciles à réparer et qu'elle fournisse des

documents techniques détaillés combinés à la mise à disposition et distribution des pièces détachées. Les Repair Cafés permettent une mise en réseau intéressante de support aux réparateurs amateurs. Néanmoins, une réparation professionnelle est toujours nécessaire dans le cas de services complexes ou de réparations très exigeantes que les clients ne se sentent pas capables de faire eux-mêmes.

Parallèlement, le recyclage des produits existants est la deuxième approche la plus utilisée. Elle est liée à la demande des consommateurs pour une production plus responsable [15]. Cependant, seulement 62,5 % des projets de recyclage de l'entreprise impliquent une activité spécifique de collecte des produits en fin de vie. Cela pourrait être un obstacle futur, compte tenu du risque de ne pas avoir un apport stable de déchets collectés. De plus, le recyclage nécessite des connaissances spécifiques en matière de conception de produits et de sciences des matériaux pour traiter les propriétés physiques et chimiques de nombreux matériaux composites [11]. Bien que les équipes techniques soient expertes dans la création de nouveaux produits, trouver un moyen de les démanteler et de les recycler n'est pas évident, nécessitant des activités de R&D. C'est pourquoi l'éco-conception pour le recyclage est la démarche la plus utilisée parmi toutes les pratiques d'éco-conception (66,6 %). Son objectif est de faciliter le processus de recyclage dès la phase de conception lors du développement de nouveaux produits.

L'approche d'upcycling de refonctionnalité à une représentation plus petite en raison de la difficulté de sa mise à l'échelle industrielle. Les concepteurs et les fabricants d'upcycling sont confrontés à des obstacles qui impliquent un manque de ressources abordables, telles que l'espace de travail, l'équipement, le temps, la main-d'œuvre qualifiée et les matières premières [18]. Ces opérations sont principalement manuelles et nécessitent des compétences élevées en raison de la variabilité des déchets. De cette façon, ils sont coûteux. Dans ce contexte, il existe deux courants : (i) industrialiser et automatiser l'upcycling ; et (ii) reproduire les entreprises artisanales de recyclage à l'échelle locale. La deuxième proposition pourrait être complémentaire au recyclage traditionnel axé sur la production de masse et le volume élevé. Pendant ce temps, les entreprises de recyclage mettraient l'accent sur la création de produits uniques à plus petite échelle, mais avec une création de valeur plus élevée. Les communautés locales, tel que Precious Plastic (recyclage artisanal), peuvent développer un potentiel de transformation pour défier les institutions dominantes, s'efforçant d'atteindre l'EC [17].

#### 4.2. Analyse qualitative des projets circulaires

Trente-trois personnes impliquées en tant qu'acteurs ou initiateurs des différents projets circulaires ont répondu à une enquête basée sur des entretiens afin de mieux comprendre les motivations, les difficultés et les défis rencontrés par ces projets. Sur les motivations des porteurs, nous avons constaté que l'objectif principal était en fait de pouvoir s'aligner aux principes de l'EC : ils visent à prolonger la durée de vie des produits par le partage, la

réutilisation et la réparation, puis, en fin de vie, ils réintroduisent les déchets comme matière première grâce à l'upcycling et au recyclage.

En ce qui concerne les principaux défis, il y a souvent une problématique de rentabilité économique. Notamment pour favoriser la réparabilité, ce sont les coûts de réparation élevés qui empêchent les clients d'utiliser ce service au lieu d'acheter un nouveau produit. Aussi, il est crucial d'avoir des pièces mutualisées entre les différents produits pour faciliter les opérations de réparation. Par conséquent, les personnes interrogées ont privilégié parfois l'investissement dans des solutions moins chères qui engagent le client, telles que des vidéos DIY, la fourniture de pièces détachées et des kits de réparation DIY. La création de produits plus durables et réparables est aussi jugée comme essentielle pour le reconditionnement et le partage (économie de la fonctionnalité).

Concernant la seconde vie, l'entreprise remet le produit en état avant de le revendre. Il bénéficie d'une garantie neuve équivalente à celle d'un produit neuf. Pourtant, les personnes interrogées n'ont proposé que des solutions de reconditionnement et non de remise à neuf (remanufacture) : ils ne reprennent que les produits nécessitant des réparations mineures. En effet, il apparaît que les clients sur-estiment généralement l'état de leur produit. Un autre défi est la logistique : lorsqu'on travaille avec le marché de l'occasion, il est difficile d'avoir une offre de produits stable, car cela dépend de ce que les clients rapportent. Ainsi, ils explorent des solutions pour reprendre les produits via une procédure en ligne dans laquelle le client n'a pas à se déplacer physiquement en magasin. Enfin, dans le cas des projets d'économie de fonctionnalité, le défi est le fort impact sur les activités informatiques, d'approvisionnement et de financement. Il s'agit aujourd'hui majoritairement de projets locaux de location courte durée portés par les magasins ou certaines régions. Elle doit devenir une stratégie d'entreprise commune pour gagner en viabilité économique et technique. L'entreprise vise à se concentrer sur le modèle d'abonnement, qui nécessite moins de points de contact avec le client par rapport à la location à court terme. Pourtant, il est nécessaire de former les salariés aux tâches liées à l'économie de la fonctionnalité, qui sont différentes de celles d'un vendeur.

Dans le cas des stratégies de fin de vie, on perçoit que les principaux enjeux sont liés à la chaîne de valeur du recyclage/upcycling plutôt qu'aux aspects techniques. Ainsi, la collecte, le tri et le désassemblage représentent un goulot d'étranglement pour les processus industriels de transformation des déchets produits. La collecte est une étape essentielle qui touche toute la logistique inverse, mais elle dépend de l'engagement du client. Le retour des déchets d'équipements électriques et électroniques est déjà en place dans l'Union européenne depuis 2009 (directive 2012/19/UE). Cependant, les taux de collecte restent faibles avec 48,5 % par rapport à l'objectif 2019 de 65 % [18]. De plus, la collecte en magasin [appelée collecte ciblée] constitue une nouvelle activité pour les salariés des enseignes qui n'y sont pas habitués et la considèrent parfois comme hors de leur champ de travail. De plus, le démontage est un obstacle, notamment pour les produits

multimatériaux. Néanmoins, ce problème peut être adressé dans les futurs produits par l'éco-conception pour faciliter le désassemblage ou l'éco-conception pour le recyclage, en créant des produits mono-matière ou des produits dont on peut facilement séparer les matériaux ou les valoriser dans des mêmes filières de recyclage.

Lors de nos entretiens, un point important qui est ressorti et que, malgré les différences dans les caractéristiques des projets, la principale motivation pour commencer à travailler avec la circularité est la conviction personnelle des porteurs : les représentants des projets circulaires estiment qu'il est fondamental d'assumer la responsabilité de l'impact environnemental généré par les activités de l'entreprise. Par ailleurs, le plan de transition de l'entreprise vers la circularité a joué un rôle important pour les accompagner. Néanmoins, ils déclarent également avoir des difficultés avec un manque de ressources (financières et temps) pour mettre en œuvre leurs projets. La gouvernance de la circularité est dans une phase de structuration dans l'entreprise, donc les représentants des projets circulaires peuvent avoir des difficultés quant à leur périmètre d'action. Entrer en contact avec d'autres représentants de projets circulaires peut être complexe, compte tenu de la taille de l'entreprise. De plus, il est aussi difficile de lancer un nouveau projet circulaire une fois que l'entreprise n'a pas eu d'expérience au préalable dans ce domaine. Enfin, certaines personnes ont déclaré rencontrer des obstacles dus à la faisabilité économique du projet : malgré des indicateurs de performance (KPI) prometteurs en termes d'analyse de cycle de vie, l'entreprise est parfois attachée à une logique linéaire. Il est encore difficile en général de déterminer une méthodologie concernant l'évaluation globale des avantages de l'EC une fois que l'on considère le grand nombre de variables tout au long du cycle de vie d'un système [19].

Nos résultats sont alignés avec ceux d'une étude antérieure [20] qui défend que l'EC fait face à des défis dans sa phase de mise en œuvre en raison des limitations technologiques, de l'inertie institutionnelle et des préférences dynamiques des clients qui limitent l'évolutivité de l'entreprise. En outre, des facteurs externes [par exemple, réglementation, marché, réseau d'approvisionnement et de partenaires, socioculturels, technologie et infrastructure, connaissances et informations et environnement] ont un impact sur les modèles de stratégies circulaires, exigeant des entreprises qu'elles personnalisent leurs offres de produits et de services en fonction du pays dans lequel elles opèrent [21]. Par exemple, la mise en place de la responsabilité élargie du producteur pour les articles de loisir et de sport en France en 2023 sera un facilitateur pour l'EC, car elle vise à engager les acteurs de l'industrie du sport dans les activités de gestion, de réparation et de réutilisation des déchets [22].

## 5. CONCLUSION

Cet article analyse la transition de la linéarité vers la circularité d'une entreprise internationale spécialisée dans la conception et la fabrication d'articles de sports. L'objectif était de cartographier les boucles circulaires qui se mettent en place dans l'entreprise, de découvrir les enjeux rencontrés dans ce domaine et de comprendre les motivations intrinsèques de ces projets circulaires. Dans cette étude, nous avons créé un cadre d'analyse pour cartographier les stratégies circulaires existantes. Ensuite, 154 projets circulaires liés à 89 natures de produits sportifs ont été classés selon le cadre proposé qui a été précisé avec un niveau de granularité plus fin en caractérisant les différentes approches utilisées pour favoriser l'EC. Finalement, des entretiens qualitatifs avec 33 représentants de projets circulaires ont été effectués pour analyser les résultats quantitatifs. Les représentants de projets sont souvent motivés par des convictions personnelles, mais ils rencontrent des difficultés d'allocation des ressources (temps et financement). De plus, les représentants des projets circulaires estiment que la viabilité économique reste la priorité, tandis que le gain environnemental passe au second plan. Avoir une gouvernance forte en matière de circularité et un réseau circulaire structuré est essentiel pour faire avancer les projets circulaires.

En perspective de ces travaux, la recherche de projets circulaires au sein de l'entreprise sportive étant difficilement exhaustive, de nouveaux projets ont été découverts à chaque fois qu'un entretien était mené. Pourtant, cette étude donne une tendance de la situation actuelle de l'entreprise dans l'exécution de la transition vers la circularité. Cet outil pourrait être utilisé par des gestionnaires de l'organisation afin de déterminer une stratégie efficiente et unifiée pour aborder la transition circulaire, en évitant, par exemple, des projets doublons ou pour lancer des actions conjointes et mutualisées pour le partage de ressources communes. En outre, cela permet une visualisation plus claire des boucles circulaires et approches qui nécessitent aujourd'hui de plus attention, concernant les investissements pour leur implémentation. Pour les prochaines études, il serait important de collecter des données concernant l'impact économique et social de chaque projet afin de pouvoir les pondérer au lieu de simplement considérer le nombre absolu de projets circulaires. Aussi, malgré le grand intérêt pour la circularité, certaines personnes ont des difficultés à choisir quelle boucle et stratégie de la circularité est la plus adaptée ou optimale à leur produit. Ainsi, la création d'un outil d'aide à la décision multicritères est en cours pour prendre en compte les facteurs environnementaux, économiques et sociaux.

## RÉFÉRENCES

- [1] BPCE L'Observatoire. La filière sport prend ses marques [Internet]. 2020 [cité 22 avr 2022]. Disponible sur: <https://groupebpce.com/en/content/download/19001/file/Observatoire-sport-27fev.pdf>
- [2] Amsalem B, Mechmache M. L'économie du sport - Avis du Conseil

- économique, social et environnemental [Internet]. 2019 [cité 22 avr 2022]. Disponible sur: [https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2019/2019\\_19\\_économie\\_sport.pdf](https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2019/2019_19_économie_sport.pdf)
- [3] Schneider S, Mücke HG. Sport and climate change—how will climate change affect sport? *Ger J Exerc Sport Res* [Internet]. 6 déc 2021 [cité 26 août 2022]; Disponible sur: <https://link.springer.com/10.1007/s12662-021-00786-8>
- [4] Wicker P. The carbon footprint of active sport participants. *Sport Manag Rev*. 1 août 2019;22(4):513-26.
- [5] Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition | Shared by Business [Internet]. 2013 [cité 31 mai 2022]. Disponible sur: <https://emf.thirdlight.com/link/x8ay372a3r11-k6775n/@/preview/1?o>
- [6] Winans K, Kendall A, Deng H. The history and current applications of the circular economy concept. *Renew Sustain Energy Rev*. févr 2017;68:825-33.
- [7] The Circular Economy In Detail [Internet]. [cité 31 mai 2022]. Disponible sur: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/explore/the-circular-economy-in-detail>
- [8] Kirchherr J. Conceptualizing the circular economy\_ An analysis of 114 definitions. 2017;12.
- [9] Korhonen J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecol Econ*. 2018;10.
- [10] Menu B, Jenny F, Valérie L, Jean-François B. From Product to Dust: Looking at the Ways to Regenerate Value in Product Life Cycle. *Proc Des Soc Int Conf Eng Des*. juill 2019;1(1):321-30.
- [11] Ludeke-Freund F, Gold S, Bocken NMP. A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. 25 avr 2018;26.
- [12] Ritter M, Schanz H. The sharing economy: A comprehensive business model framework. *J Clean Prod*. 10 mars 2019;213:320-31.
- [13] Henry M, Schraven D, Bocken N, Frenken K, Hekkert M, Kirchherr J. The battle of the buzzwords: A comparative review of the circular economy and the sharing economy concepts. *Environ Innov Soc Transit*. 1 mars 2021;38:1-21.
- [14] Repair motivation and barriers model: Investigating user perspectives related to product repair towards a circular economy | Elsevier Enhanced Reader [Internet]. [cité 14 mars 2023]. Disponible sur: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652620356900?token=021758F1B8C3EC9F593CB9F1088AD346976892A32E4DE027B4C70B2DA897B9BECDBEED38BF9DA877A8028A65C1080D84&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230314095153>
- [15] Hole G, Hole AS. Recycling as the way to greener production: A mini review. *J Clean Prod*. 1 mars 2019;212:910-5.
- [16] Singh J, Sung K, Cooper T, West K, Mont O. Challenges and opportunities for scaling up upcycling businesses – The case of textile and wood upcycling businesses in the UK. *Resour Conserv Recycl*. nov 2019;150:104439.
- [17] Spekkink W, Rödl M, Charter M. Repair Cafés and Precious Plastic as translocal networks for the circular economy. *J Clean Prod*. 12 nov 2022;135125.
- [18] Eurostat. Waste statistics - electrical and electronic equipment [Internet]. 2022 [cité 30 mai 2022]. Disponible sur: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics\\_-\\_electrical\\_and\\_electronic\\_equipment](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment)
- [19] Sassanelli C, Rosa P, Rocca R, Terzi S. Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. *J Clean Prod*. août 2019;229:440-53.
- [20] Pal R, Gander J. Modelling environmental value: An examination of sustainable business models within the fashion industry. *J Clean Prod*. 20 mai 2018;184:251-63.
- [21] Han D, Konietzko J, Dijk M, Bocken N. How do companies launch circular service business models in different countries? *Sustain Prod Consum* [Internet]. 16 mars 2022 [cité 24 mars 2022]; Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922000641>
- [22] Ecologic. Nouvelle REP\*, la filière des ASL : Articles de Sport et de Loisirs [Internet]. Ecologic France. 2021 [cité 31 mai 2022]. Disponible sur: <https://www.ecologic-france.com/ecologic/filiere-asl-articles-de-sport-et-de-loisirs.html>

# Low Tech et Communs : quel positionnement et quels enjeux pour les futurs systèmes de production

U. Girard <sup>a\*</sup>, T. Reyes <sup>b</sup>

<sup>a,b</sup> UR InSYTE Université de Technologie de Troyes, 12 Rue Marie Curie, 10300 Troyes

\* e-mail : ulyse.girard@utt.fr

## 1. INTRODUCTION

La crise écologique et sociale est dernièrement devenue beaucoup plus concrète avec des modèles théoriques plus fins comme les limites planétaires [1] dont 6 sont déjà franchies [2] et la théorie du donut [3] qui identifie les enjeux sociaux et environnementaux nécessaires pour que l'espèce humaine puisse vivre dans un cadre juste et sûr.

Pour éviter le point de non-retour, il est indispensable et désormais urgent de repenser nos modèles de sociétés et par là même, tout ce qui en découle. Cet article s'intéresse à un secteur ayant des impacts environnementaux et sociaux importants : le système industriel (25,8% des émissions de GES en France métropolitaine en 2019 [4]). Le système actuel, malgré les efforts réalisés en termes de réduction de consommation des ressources à travers des approches d'économie circulaire, fait toujours face à une demande croissante et y répond par une extraction effrénée de ressources, sans suffisamment prendre en compte les rejets ou externalités négatives qui y sont associés. On peut prendre pour exemple Nespresso, qui d'un côté finance des programmes d'aide aux petits producteurs de café au Soudan du Sud mais de l'autre produit des capsules à usage unique en aluminium et ne donne aucun chiffre sur leur taux de recyclage [5].

D'après le rapport de l'atelier de Réflexion Prospective FUTURPROD [6], il existe 4 scénarios possibles pour les futurs systèmes de production Français : désindustrialisation, industrie 4.0, économie circulaire et néo-industrialisation. Dans cet article, on s'intéressera à comment accompagner le système industriel vers le scénario « néo-industrialisation », basé notamment sur la coopération et les Communs. Pour comprendre comment accompagner les industries vers ce scénario, cet article se focalisera sur les concepts de Low-Tech et de Communs. La première est une voie esquissée dans les années 1970 par [7] et qui a pour vocation de dessiner un modèle

alternatif au système de production actuel. Les seconds, remis au goût du jour notamment par [8], visent à redéfinir notre rapport à la propriété en promouvant une philosophie axée sur le partage et la coopération.

Cet article vise à donner une première compréhension de ce que sont les LT et les Communs dans les LT. Une première définition pourrait d'ailleurs être celle du Low Tech Lab, à savoir qu'une innovation Low Tech est « Utile, Accessible et Durable » [9]. Cette définition étant souvent reprise mais restant non consensuelle parmi les acteurs du mouvement, comme nous le verrons par la suite. Ce concept étant franco-français, il est ainsi intéressant de pouvoir le positionner par rapport à la littérature internationale du Design for Sustainability [10]. Il sera question d'explorer quels sont les bénéfiques, les leviers et les freins pour accompagner les futurs systèmes de production à s'orienter vers des approches plus cohérentes vis à vis des enjeux socio-écologiques.

La prochaine section présentera un l'état de l'art des tentatives de définition des LT ainsi qu'une proposition de définition et une sous-partie sur les Communs dans les LT. A partir de cela nous ferons une comparaison avec les différentes approches du Design for Sustainability en se basant sur le travail de [10] pour positionner les LT par rapport au DfS. Enfin, à partir des sections précédentes nous proposerons une discussion autour des freins à la démocratisation des LT dans la société.

## 2. ÉTAT DE L'ART

Il existe de multiples modes de production alternatifs décrits par [11] tels que les Slow Tech, les Rebel Tech ou encore les Wild Tech. Pour cet article, nous avons choisi d'étudier les LT car le concept se démocratise en France ces dernières années et compte un nombre d'acteurs élevé et diversifié. De plus, le réseau autour du mouvement est en train de se structurer et voit l'intérêt naissant d'acteurs extérieurs : l'État [11], des entreprises

et des universités [12] ou encore les structures de l'économie sociale et solidaire [13].

## 2.1. Low Tech

L'émergence des LT dans le contexte Français n'est pas clairement établie mais elle se situe dans la période 2010-2015. La création de la Société Coopérative d'Intérêt Collectif (SCIC) L'Atelier Paysan en 2009, la parution de l'ouvrage « L'Age des low tech » de Philippe Bihoux en 2014 ou encore la création du Low-Tech Lab par Corentin de Chatelperron la même année peuvent être considérées comme des points de référence à l'origine de leur expansion actuelle sur notre territoire. S'en est suivi le projet Nomade des Mers, créé par le même Corentin de Chatelperron : un tour du monde en voilier à la recherche de projets Low-Tech à expérimenter et documenter (2016-2022). Le suivi de l'expédition par Arte a conduit à une diffusion large et à la notoriété du projet et du Low-Tech Lab [14].

Les LT sont donc un concept relativement récent et surtout en constante évolution depuis leur création. Il est encore aujourd'hui très difficile de définir ce que sont les LT, en commençant par le cadre d'application. Au départ, on parlait d'artefacts ou des systèmes LT puis le concept s'est élargi bien au-delà des frontières matérielles, en témoigne le message sur la page d'accueil du site web du Low-Tech Lab : « nous employons le terme low-tech pour qualifier des objets, des systèmes, des techniques, des services, des savoir-faire, des pratiques, des modes de vie et même des courants de pensée » [9].

L'idée des LT, bien que leur nom soit un anglicisme s'opposant directement aux High Tech, n'est pas d'imposer une éradication de ces dernières mais d'apprendre à mieux utiliser la technologie. Cependant, si les LT ne s'opposent pas frontalement aux HT, elles s'opposent à l'idée de croissance verte, celle d'une sortie par le haut via la technologie comme le projette le scénario n°3 de [15] « Technologies vertes » ou le scénario de rupture n°1 de [6] « Des technologies clés génériques à forte valeur ajoutée ». En effet, la high tech a sa place dans un monde soutenable, mais de manière réfléchie, en faisant preuve de techno-discernement. Comme le dit Philippe Bihoux « Chez le dentiste, la technologie est plutôt intéressante. Pour concevoir un réfrigérateur qui peut faire les courses tout seul, peut-être pas. » [16].

De nombreux acteurs se sont essayés à définir les LT. En effet, les contours du concept sont vagues même si une certaine philosophie de pensée s'en dégage. Il existe une multitude de définitions, en commençant par les plus emblématiques comme celles de [17] et [9]. Ces dernières années, une série de travaux d'essai à ce difficile exercice de définition ont été réalisés par divers acteurs comme [18], [19], [11] et [20]. Outre les nouvelles définitions produites, deux aspects sont ressortis de ces travaux.

Premièrement, il en découle que l'on passait de la définition d'un système LT à une démarche LT. La première partie de la définition de [11] pose très clairement ce point : « Le qualificatif de low-tech s'applique à une démarche et non pas à son résultat. Ainsi, un objet n'est pas low-tech dans l'absolu, il est plus (ou

moins) low-tech qu'une solution alternative répondant au besoin initial. ». Cela permet d'illustrer davantage les dimensions systémiques, politiques et constituantes des LT en plus de leurs aspects purement liés à la technique. Ce mouvement vise à entraîner un changement de paradigme, d'imaginaire autour de la technologie. [21] résume cela par : « penser « low-tech » au sens strict exclurait sinon une trop grande majorité des biens et des services et ce alors que l'objectif principal de cette pensée est d'initier un mouvement global ».

Deuxième point, un certain nombre de caractéristiques des LT ont été établies telles que la sobriété, l'empouvoirement (capacité à donner du pouvoir à l'utilisateur) ou encore la dimension transformante des LT. Cela a permis de mieux cadrer le concept et a ouvert à une diffusion plus facile en dehors du réseau de mouvement LT (grand public, monde associatif, industriels...). Nous avons repris les principales caractéristiques des principales définitions des LT et les avons classées dans 3 domaines : écologique (impact sur le vivant, les écosystèmes non-humains, le système Terre), social (impact sur les interactions et relations humaines) et sociétal (impact sur les sociétés et systèmes humains à grande échelle).

Sur le plan écologique, les LT répondent à des besoins essentiels, l'utilité étant au cœur du concept ([18], [19], [11], [20], [9]). Elles sont également réellement durables, c'est-à-dire qu'elles sont entre autres robustes, réparables ou maintenables, réutilisables et recyclables ([17], [18], [19], [9]). La soutenabilité des LT est forte, l'ensemble du cycle de vie des objets et systèmes est pris en compte pour assurer la viabilité et la pérennité de la production ([18], [20], [9]). Les LT sont « Situées », elles répondent à des besoins locaux, avec des matériaux le plus locaux possibles et sont fabriquées au plus près des lieux de consommation ([17], [18], [20], [9]). Enfin, les LT sont sobres, c'est-à-dire qu'elles prônent une économie maximale des ressources nécessaires, elles utilisent au maximum des matériaux non rares ou nocifs, la technologie est réduite au minimum nécessaire pour répondre au besoin et est optimisée pour être la plus efficiente possible ([17], [18], [19], [11], [20]).

Sur le plan social, les LT sont accessibles, appropriables, autonomisantes, et conviviales. L'accessibilité se fait par une distribution locale, proche des utilisateurs et un prix abordable par la majorité de la population concernée ([11], [9]). Les LT doivent également être fonctionnelles, simples d'utilisation et réparables facilement, si possible par l'utilisateur lui-même ce qui les rend appropriables et donc autonomisantes ([17], [18], [11], [20], [9]). Elles donnent du pouvoir aux utilisateurs et leur rend la maîtrise technologique, aujourd'hui enfermée dans les bureaux d'études. Enfin les LT sont conviviales, elles permettent le partage, la coopération, la collaboration et favorisent la cohésion sociale ([18], [9]). Par là même, elles mettent en avant le retour du travail humain au profit de celui des machines ([17], [20]).

Sur le plan sociétal, les LT ont pour but d'opérer des changements de modèle dans plusieurs domaines via les

caractéristiques suivantes. Tout d'abord, les LT induisent des questionnements, tant sur les besoins que sur la technique et son utilisation ou même sur la définition de la valeur ([17], [18], [19], [11], [20], [9]). Elles sont critiques de notre système et de nos pratiques, que ce soit industrielles, économiques, sociales, organisationnelles ou encore politiques ([17], [19], [20]) et elles prônent leur remise en cause pour une décomplexification sociétale [18]. Par exemple, le fait qu'elles soient « Situées » (voir plus haut) va engendrer un changement systémique, une relocalisation d'une partie de la production, les lieux de production vont diminuer en taille mais probablement augmenter en nombre. Tout cela devra se faire de manière responsable afin de ne pas perdre les bons effets de notre système centralisé [17]. Enfin, les LT ont pour vocation de nous transformer, psychologiquement, culturellement et dans nos comportements [18], [20].

Cependant, aucun consensus ne ressort aujourd'hui pour définir le terme LT. Cela peut s'expliquer par le fait de la relative nouveauté du concept, la diversité des acteurs, les enjeux économiques et politiques liés au déploiement des LT et que toutes ces définitions restent critiquables. Nous prendrons pour exemple l'approche de G. Roussilhe qui recentre les LT sur un questionnement de la technique et les définit comme cela : "Dans le contexte de la crise environnementale je définirais la "low-tech" comme : une démarche politique qui permet de recomposer par la "technique" son rapport à un monde contraint." [22]. Dans un second travail [23] vient remettre en question l'un des fondements des LT : la redéfinition des besoins. En effet, en prenant pour exemple la pyramide de Maslow, il démontre par les 4 constats ci-après que la définition même des besoins fondamentaux n'est peut-être pas tenable :

- 1- La satisfaction à un besoin n'est pas binaire (oui/non).
- 2- On peut sacrifier la qualité de satisfaction à un besoin, même physiologique, pour privilégier, d'autres besoins, il y a donc un arbitrage conscient des besoins.
- 3- La satisfaction d'un besoin peut mettre en péril la réponse à d'autres besoins et la survie même de l'individu à moyen et long terme.
- 4- La satisfaction des besoins n'est pas un exercice individuel et dépend de conditions collectives sur lesquelles les individus n'ont pas forcément de poids.

En appliquant l'approche de Max-Neef aux Low-Tech, Roussilhe en arrive à sa propre définition des LT sous forme d'une seule question, à savoir : « Qu'est-ce qui nous suffit pour nous épanouir collectivement dans un monde contraint ? ». Cette définition est beaucoup plus large et floue que celle proposée par [18] par exemple mais elle met en évidence un aspect qui ne ressort pas des autres définitions du concept : la finalité des LT.

## 2.2. Définition des Low Tech

A partir de ce travail, nous allons donner notre propre définition des LT, qui servira de base à nos futurs travaux dans le domaine.

Nous définissons donc la LT comme une démarche de transformation sociétale par la conception.

Elle est applicable à différentes échelles et dans de nombreux domaines. A l'origine elle concernait des objets puis les systèmes techniques et tend désormais à une extension en dehors du système socio-technique.

Au sein de l'humanité, elle est mise en pratique dans les milieux déjà pauvres en ressources à des fins de subsistance et commence à l'être dans les milieux aux ressources abondantes pour s'adapter à la crise écologique et sociale qui débute.

La philosophie LT suit un certain nombre de critères dont les principaux sont : utile, durable, située, soutenable, sobre, accessible, appropriable, conviviale, questionnante, critique de notre système/de nos pratiques et enfin transformante.

Sa finalité est l'initiation de la transformation vers des modèles de société adaptés à leurs milieux via notamment une utilisation de la technique en conscience de la nécessité de préserver l'équilibre du vivant, du système Terre et de l'humanité pour que notre espèce puisse continuer à prospérer de manière pérenne.

Enfin, ce concept est en constante évolution, ce qui le rend extrêmement pertinent. En effet, la crise dans laquelle nous entrons étant une première dans l'histoire de notre espèce, nous allons devoir être agiles et adapter nos stratégies au fil du temps et des événements pour être résilients sur le long terme.

## 2.3. Les Communs dans les Low Tech

Il existe peu de littérature faisant un lien entre Low-Tech et Communs, cependant, les deux concepts sont assez proches et un certain nombre d'acteurs des Low-Tech mobilisent des aspects des Communs. Pour illustrer ce lien nous nous appuyons sur [24], qui liste quelques exemples d'applications concrètes.

Tout d'abord les Communs sont basés sur 3 piliers : une ressource qui est exploitée (matérielle ou immatérielle), une gouvernance autour de cette ressource et une communauté qui exploite cette ressource : « Les biens communs (ou "Communs") sont des ressources gérées collectivement par une communauté selon une forme de gouvernance définie par elle-même. » [24]. Les Communs d'aujourd'hui se caractérisent majoritairement par de l'immatériel : outils numériques- (pad collaboratifs), savoirs (Wikipédia), licences (creative commons).

L'Atelier Paysan est par exemple cité comme une communauté produisant des Low-Tech sous forme de Communs [24]. La ressource est une librairie numérique de plans de machines agricoles en libre accès (licences creative commons). Ces plans sont créés par des ingénieurs qui conçoivent des machines à partir des besoins et inventions des agriculteurs qui adaptent les outils industriels à leurs pratiques. Le but est de permettre à tout paysan d'auto-construire ses machines ou de se former à l'auto-construction, on parle ici d'empouvoirement des paysans. La communauté quant à elle est constituée de paysans, d'ingénieurs et de divers partenaires. La gouvernance de la coopérative est partagée entre les membres de la communauté (SCIC SA, à Directoire et Conseil de surveillance).

Cet exemple montre que Low-Tech et Communs sont compatibles et surtout complémentaires. Là où les Low-Tech permettent de produire des systèmes visant à nous projeter dans un monde soutenable, les Communs apportent une manière de gouverner et de diffuser ces innovations et ces savoirs de manière responsable, équitable et proactive. Ainsi, d'autres pourront reprendre le travail déjà commencé, l'appliquer à leurs besoins, l'adapter puis le compléter et l'améliorer avec leurs expériences. Les Communs permettent aussi de sortir du paradigme financier/capitaliste, chacun étant à la fois bénéficiaire et contributeur, l'intérêt n'est plus à tirer un parti financier mais bien le maximum d'efficacité/efficience car « ce que je fais pour moi, je le fais aussi pour les autres et ce que les autres font pour eux, ils le font aussi pour moi. ».

### 3. POSITIONNEMENT DES LOW TECH DANS LE DFS

Dans cette section, nous utiliserons le travail de [10] pour tenter de positionner les LT par rapport aux différentes approches du Design for Sustainability. Dans son article, [10] détaille les différentes approches du DfS et leur évolution. Il replace ensuite ces approches par niveau et les positionne les unes par rapport aux autres sur un graphique, le but étant de donner une image de l'évolution des approches de soutenabilité en conception. Le positionnement est effectué sur 2 axes, l'un permettant de souligner le caractère insulaire ou systémique d'une approche, l'autre de les classer des plus centrées sur les technologies aux plus centrées sur les utilisateurs. [10] divise également les approches en quatre niveaux d'innovation : l'amélioration ou la création de produits, la combinaison produits et services, la dimension spatio-sociale et le niveau du système socio-technique.

Cependant, la plupart de ces approches sont construites pour être appliquées dans les bureaux d'études d'industries « capitalistes », nous entendons par là des industries du modèle des pays dit « Développés » et purement axées sur la rentabilité et la croissance, considérant les aspects écologiques et sociaux comme secondaires. La démarche LT quant à elle est flexible et donc applicable presque partout, du garage d'un bricoleur à un atelier associatif, une industrie ou un territoire et peu importe la situation géographique ou culturelle. Le projet Nomade des Mers a d'ailleurs documenté de nombreux projets partout sur le globe. Le plus compliqué pour les LT sera l'application dans ces industries dites « capitalistes », dont les fondements sont par définition opposés à la philosophie LT.

Cernant les caractéristiques des LT, il convient de revenir sur les approches décrites par [10] niveau par niveau. Dans la figure 1, nous avons tenté de comparer les caractéristiques principales des LT avec les approches du DfS décrites par [10].

Niveau d'innovation	Système socio-technique												
	Spatio-social												
Approche	Système produit-service												
	Produit												
Caractéristique	Green Design	Ecodesign	EDD	CTC	BM	DfSB	DfBoP	PSS for Eco-eff.	PSS for Sust.	PSS BoP	Df social Innov.	Systemic Design	DfSiaT
<b>Impact écologique</b>													
Utile/Essentiel							1			1			
Durable	1	2	1	1	1	1		2	2	2		2	
Local/Situé							1					2	
Soutenable/Pérenne		1		1	1				1	1		1	
Sobre								1		1			
<b>Impact social</b>													
Appropriable/Autonomisant											1		
Accessible							3			3			
Convivial											2		
<b>Impact sociétal</b>													
Questionnant													1
Critique													1
Transformateur													2

Caractéristique	
Présente	3
En partie présente	2
Nuancée/Implicite	1
Absente	

Figure 1 - Comparatif des approches du DfS et des Low-Tech par caractéristiques (fourni par l'auteur)

Les approches des niveaux Produit et Système Produit Service sont plus éloignées des LT. En effet, elles n'ont que très peu de points de concordances et seulement aux niveaux des caractéristiques écologiques. La plus proche est l'approche PSS for BoP qui mixe les caractéristiques écologiques avec les aspects sociaux de l'approche BoP. Au niveau spatio-social, le Design for Social Innovation reprend en partie la caractéristique « Convivial » et implicitement « Appropriable/Autonomisant ». Cependant elle n'intègre ni les impacts écologiques ni les impacts sociétaux. Le Systemic Design quant à lui reprend une partie de l'aspect durabilité et local à travers le rebouclage des flux (les déchets comme matières premières pour d'autres). Cependant, cette approche n'inclut aucune caractéristique sociale ou sociétale. Pour finir, le Design for System Innovations and Transitions est la seule approche de DfS introduisant les impacts sociétaux. Cependant, même dans ce domaine, elle est encore assez éloignée des LT, les caractéristiques « Questionnant » et « Critique » étant implicites. Néanmoins, une des limites de cette approche selon [10] est qu'elle ne fait pas le lien entre le niveau d'innovation systémique et le niveau d'innovation produit. En ce qui concerne les LT, les caractéristiques du domaine social et écologique sont applicables au niveau produit et ont des répercussions au niveau systémique. Les LT peuvent donc être en partie considérées comme un lien entre ces deux niveaux d'innovation.

Avec tous ces éléments, nous pouvons reprendre le schéma de l'évolution du DfS proposé par [10] et positionner les LT par rapport à son travail. La figure 2 montre notre positionnement des LT par rapport au DfS.

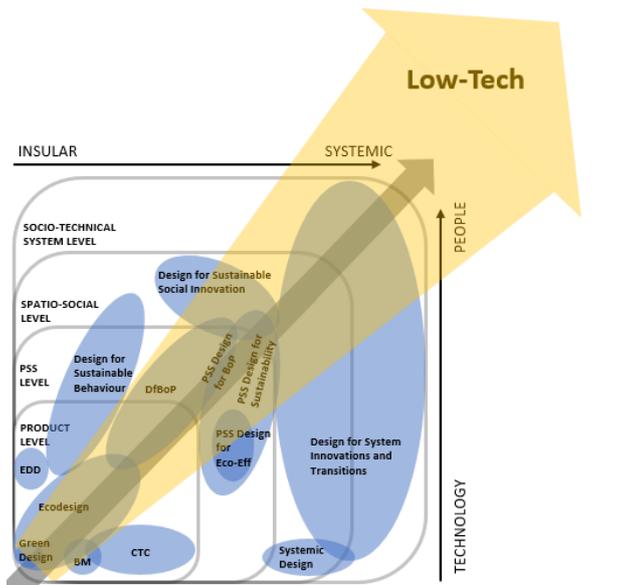


Figure 2 – Positionnement des Low-Tech dans le DfS (réalisé par [10] et modifié par l'auteur)

Il est à noter que nous avons représenté les LT sous forme d'une flèche pour souligner le caractère évolutif du concept. En effet, plus la philosophie du mouvement s'approfondit, plus elle tend à sortir du système socio-technique et sa finalité à se globaliser à l'échelle de l'ensemble de notre habitat. Il ressort également le fait que les LT chevauchent les quatre niveaux d'innovation proposés par [10], ce qui démontre qu'elles apportent un lien entre des aspects présents dans plusieurs approches du DfS. Pour finir, ce positionnement établit clairement le fait que les LT sont une approche innovante qui permet de se projeter vers de nouveaux idéaux, de nouvelles perspectives.

Pour notre part, nous sommes conscients du fait qu'il existe une multitude de scénarios LT pour la transition de l'industrie et que les problèmes techniques sont complexes et très divers. Ainsi, nous n'avons pas pour but d'emmener toute l'industrie vers les LT mais seulement une partie et chaque acteur à son niveau.

#### 4. FREINS AU DEPLOIEMENT DES LOW TECH

Le concept des LT présente une vraie piste pour la transition sociétale que nous allons devoir effectuer. Le réseau LT s'est développé sous forme d'archipel décrit par [25] : on trouve des îles, des pirogues, des phares, des voiliers et des lagons. Les îles sont des territoires regroupant des praticiens et une culture LT, on peut citer la Bretagne, l'Occitanie ou encore la Nouvelle Aquitaine. Les pirogues sont de grands sujets sur lesquels travaillent les îles : l'énergie, la construction, le numérique, l'alimentation, la gestion des déchets, l'enseignement. Ces pirogues font les liens entre les îles et créent des synergies. Les phares diffusent les LT en dehors des îles pour faire rayonner le mouvement (Low-Tech Magazine, Low-Tech Lab, Philippe Bihouix...). Enfin, les voiliers sont le ciment de cette structure en archipel. Ils sont garants des Communs du réseau et veillent à sa coordination. Ces voiliers, dont le Low Tech Lab est le principal, créent les

assemblées du lagon : les grands événements d'échanges pour fédérer l'archipel.

Pendant, force est de constater que les LT restent circonscrites à un petit nombre de praticiens à l'échelle nationale et que le développement de ce réseau est au stade embryonnaire malgré une existence depuis maintenant une dizaine d'années et la crise climatique qui fait sentir ses premiers effets dans l'hexagone. Alors pourquoi un développement aussi lent ? Quels sont les freins aux LT ? Dans cette partie nous allons tenter d'apporter des réponses à ces questions.

Certains freins aux LT ont déjà été documentés et nous pouvons les classer en quatre grandes catégories.

La première catégorie concerne les freins à la **démocratisation** des LT pour le grand public pour lequel nous avons identifié trois sous-catégories : le flou autour du concept LT ou frein sémantique décrit par [11], [26] et [27], le frein culturel lié à la remise en cause d'une grande partie de ce sur quoi nos sociétés sont construites ([19], [11]) ainsi que le frein lié au fait que les LT ne peuvent rivaliser avec les idéaux de modernité et de confort apportés par les high tech ([19] [28] [26] [29]).

La seconde catégorie relève des freins liés au **système**. Tout d'abord réglementaire car il n'existe pas encore de lois adaptées à la production et à l'utilisation des LT ce qui, à terme, crée des réticences à se lancer pour les potentiels producteurs et à acheter pour les potentiels utilisateurs ([19], [11], [30]). Ensuite, il y a évidemment le frein **économique** [11]. Comme le souligne [29], il est difficile de créer des entreprises allant à l'encontre des principes de croissance et de rentabilités de toutes les autres. De plus, la philosophie LT s'opposant au fondement du système capitaliste actuel : Comment arriver à faire émerger ce concept ? [28] Et comment éviter l'inévitable effet rebond, caractéristique pour les innovations actuelles ? [28] Enfin, il reste le frein **politique**. Les intérêts politiques actuels étant loin de ceux des LT [26], les politiques de financements ne sont pas adaptées pour faire émerger le concept [30].

La troisième catégorie se situe au niveau du mouvement des producteurs des LT. Premièrement, les LT étant avant tout citoyennes, les investissements sont faits par des particuliers et donc faibles [30]. Il existe également des freins internes dans le réseau des producteurs de LT [30] et la gouvernance de ce réseau en archipel est un enjeu important [28]. Par ailleurs, l'idée de la récupération des LT par les acteurs de l'industrie plane dans l'esprit des membres du mouvement ([28] [31]). [21] parle même de « Comment détecter et lutter contre le low-tech washing ? ». Enfin, un des freins inhérents au LT est le passage à l'échelle, la montée en généralité décrite par [32] et [27]. Les LT sont très liées à leurs milieux locaux et dans notre système globalisé, il sera compliqué de répandre le concept sans dériver vers une standardisation qui tuera à coup sûr la philosophie des LT.

La quatrième et dernière catégorie est constituée des freins liés à l'utilisation des LT. L'étude de [33] a permis d'identifier quatorze types de problèmes dont les 3 principaux sont : compatibilité avec les conditions de vie

(également relevé par [32] et [27]), performance, plaisir/idéologie.

Face à ces freins, l'enjeu va être de trouver les leviers adaptés. Quelques pistes commencent à être explorées comme pour les freins liés à l'utilisation des LT pour lesquels [33] a relevé sept principes de conception permettant de les limiter : identifier les besoins prioritaires pour en tirer les fonctionnalités nécessaires, trouver le bon équilibre entre autonomisation et l'assistance, faire attention aux caractéristiques non fonctionnelles, faciliter la découverte, rendre l'objet et son fonctionnement transparent, développer les connaissances techniques et les compétences de l'utilisateur, compenser l'augmentation des surplus et déficits matériels.

Enfin, les Communs peuvent apporter un nouvel angle d'approche pour lever les freins des LT grâce à la diffusion des savoirs par une gouvernance basée sur les Communs. Le changement du modèle de propriété en Communs va permettre de démocratiser la technique, de la rendre accessible à tous.

## 5. CONCLUSION

Les sujets développés dans cet article positionnent les LT comme une démarche de transformation sociétale par la conception. A ce titre, elle intègre une partie des aspects des approches du DfS mais se projette au-delà des frontières du système socio-technique. De nombreux freins empêchent leur démocratisation et un des enjeux majeurs pour la transition industrielle est le passage des LT d'une vision alternative à la vision principale de la conception. Les questions de recherche qui se dégagent après ce travail pourraient être les suivantes : Comment lever les freins au déploiement des LT à grande échelle ? Dans quelles mesures une approche par les Communs peut aider à la démocratisation des LT ? Pour y répondre, nous devons identifier de manière plus exhaustive les freins au déploiement des LT et les classifier avant d'aller les expérimenter sur le terrain. Dans un second temps, il faudra identifier des leviers pour dépasser les freins en s'appuyant notamment sur les Communs puis répéter l'expérimentation afin de les tester en condition réelle.

## REFERENCES

- [1] Johan Rockström *et al.*, A safe operating space for humanity. *Nature*. 23 septembre 2009.
- [2] Ropert, P. Eau douce : sur neuf limites planétaires, six ont désormais été dépassées. *France Culture*. 2022. Disponible sur: <https://www.radiofrance.fr/franceculture/pollution-chimique-sur-neuf-limites-planetaires-cinq-ont-desormais-ete-depassees-6534920>
- [3] Raworth K, Driquet M, de Coussemaker S, Driquet M. « Un espace sûr et juste pour l'humanité ». *Projet*. 2017;356(1):10.
- [4] Sénecat, A. Voiture, industrie, viande... Quelles sont les causes du réchauffement climatique en France ? *Le Monde.fr* [Internet]. 8 juill 2019 [cité 2 janv 2023]; Disponible sur: [https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/07/08/voiture-industrie-viande-queelles-sont-les-causes-du-rechauffement-climatique-en-france\\_5486767\\_4355770.html](https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/07/08/voiture-industrie-viande-queelles-sont-les-causes-du-rechauffement-climatique-en-france_5486767_4355770.html)
- [5] Gunther M. The good, the bad and the ugly: sustainability at Nespresso. *The Guardian* [Internet]. 27 mai 2015 [cité 4 janv 2023]; Disponible sur: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/may/27/nespresso-sustainability-transparency-recycling-coffee-pods-values-aluminum>
- [6] Atelier de Réflexion Prospective - Rapport final : FUTURPROD - Les systèmes de production du futur. 2013. Disponible sur : <https://anr.fr/fileadmin/documents/2016/rapport-arp-futurprod.pdf>
- [7] Schumacher, E. F. *Small is beautiful : une société à la mesure de l'homme*. Seuil, 1979
- [8] Ostrom, E. *Gouvernance des biens communs. Planète en jeu*. 2010.
- [9] Low-tech Lab. *Les Low-tech : l'innovation utile, accessible et durable*. Disponible sur: <https://lowtechlab.org/fr/la-low-tech>
- [10] Ceschin, F., Gaziulusoy, I. Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions. *Design Studies*. 1 nov 2016;47:118-63.
- [11] Ademe. Rapport final : Démarches « Low-Tech » état des lieux et perspectives. 2022
- [12] Audrey T. Rapport du PRC viabilite low-tech.
- [13] Le Labo de l'économie sociale et solidaire. Rapport d'étude : Pour des métropoles low-tech et solidaires. 2022. Disponible sur : <https://www.llelabo-ess.org/pour-des-metropoles-low-tech-et-solidaires-rapport-d-etude>
- [14] ARTE. *Nomade des Mers, les escales de l'innovation*. ARTE Boutique - Films et séries en VOD, DVD, location VOD, documentaires, spectacles, Blu-ray, livres et BD. 2018. Disponible sur: [https://boutique.arte.tv/detail/Nomade\\_des\\_mers](https://boutique.arte.tv/detail/Nomade_des_mers)
- [15] Ademe. Rapport : Transition(s) 2050, choisir maintenant, agir pour le climat.
- [16] Sarrat, S. La low-tech ou le principe du techno-discernement. *Le journal Toulousain*. 2020. Disponible sur: <https://www.lejournaltoulousain.fr/le-dossier/la-low-tech-ou-le-principe-du-techno-discernement-76291/>
- [17] Bihouix, P. *L'Âge des low tech*. Seuil. 2014.
- [18] Keller, A., Bournigal, E. Infographie « Low-tech : Assurer durablement l'essentiel pour tous » regroupant les critères de toute démarche d'innovation low-tech. 2022.
- [19] La fabrique écologique. Vers des technologies sobres et résilientes – Pourquoi et comment et développer l'innovation « low-tech » ?, 2019.
- [20] Adapté de : Martin, A., Colin, C., Gaultier, A. Infographie « Cartographie du concept low-tech : guider la conception vers des techniques soutenables. » Actes du 56ème congrès de la SELF, Vulnérabilités et risques émergents : penser et agir ensemble pour transformer durablement. 2022. Disponible sur : <https://theconversation.com/low-tech-apres-les-imaginaires-de-la-sobriete-technique-il-faut-sinteresser-aux-usages-190693>
- [21] Bournigal, E. Low-tech : définition et exemples de LA démarche d'innovation. 2022.
- [22] Roussilhe, G. Une erreur de "tech". 2020. Disponible sur: <https://gauthierroussilhe.com/articles/une-erreur-de-tech>
- [23] Roussilhe, G. Les besoins essentiels de la low-tech. 2022. Disponible sur: <https://gauthierroussilhe.com/articles/les-besoins-essentiels-de-la-low-tech>
- [24] Low-tech et Communs — Wiki des communs [Internet]. [cité 5 déc 2022]. Disponible sur: [https://wiki.lescommuns.org/wiki/Low-tech\\_et\\_Communs](https://wiki.lescommuns.org/wiki/Low-tech_et_Communs)
- [25] Gilibert C, Laurent E, Augais G, Lafforgue L, Foata M, Desauney T, et al. L'Archipel Low-Tech en France. *La Pensée écologique*. 2020;5(1):9-9.
- [26] Gilibert, C. Pourquoi l'alternative low-tech tarde à se généraliser. *Usbek & Rica*. 2020. Disponible sur: <https://usbeketrica.com/fr/article/pourquoi-alternative-low-tech-tarde-se-generaliser>
- [27] Jublin, A. Les low-tech dont nous aurions vraiment envie. *RESET*. 2019. Disponible sur: <https://reset.fing.org/les-low-tech-dont-nous-aurions-vraiment-envie.html>
- [28] Ingénieur.es Engagé.es. Low-Tech : le paradoxe de l'entrepreneuriat. 2019. Disponible sur: <https://ingenieurs-engages.org/2019/12/low-tech-le-paradoxe-de-lentrepreneuriat/>
- [29] Chauvin, H. La technologie douce méprisée par les entreprises. *Reporterre, le média de l'écologie*. 2021. Disponible sur: <https://reporterre.net/La-technologie-douce-meprisee-par-les-entreprises>
- [30] Foata-Prestavoine, M. Rapport de la Recherche-Action GLOCAL LOW-TECH. 2022.
- [31] Lefebvre, O. Ne laissons pas le marché s'emparer des low-tech. *Reporterre, le média de l'écologie*. 2022. Disponible sur: <https://reporterre.net/Ne-laissons-pas-le-marche-s-emparer-des-low-tech>
- [32] Meyer M. Comment les « low tech » se font une place en France. *The Conversation*. 2022. Disponible sur: <http://theconversation.com/comment-les-low-tech-se-font-une-place-en-france-186963>
- [33] Colin, C., Antoine Martin, A. The user experience of low-techs: from user problems to design principles. *Journal of User Experience, Usability Professionals' Association*, In press. hal-03716402

# Modélisation de la logistique interne d'une usine automobile comme un système multi-agents

S. Montoya Zapata <sup>a,c,\*</sup>, N. Klement <sup>a</sup>, C. Silva <sup>b</sup>, O. Gibaru <sup>a</sup>, M. Lafou <sup>c</sup>,

<sup>a</sup> Arts et Métiers Paristech, LISPEN, HESAM Université, Lille 59046, France

<sup>b</sup> Université de Coimbra, CEMMPRE, Département de Génie Mécanique, 3004-531 Coimbra, Portugal

<sup>c</sup> Groupe Renault, 1 Av. du Golf, Guyancourt 78280, France

\* e-mail : [santiago.montoya-zapata@renault.com](mailto:santiago.montoya-zapata@renault.com)

## 1. INTRODUCTION

L'industrie automobile fait face à un changement permanent, avec une tendance actuelle marquée par la personnalisation de masse et la variété croissante des produits. L'introduction d'un nouveau produit implique des changements importants sur la configuration d'une chaîne de production. Ainsi, la pérennité d'un site de fabrication automobile s'exprime à travers la flexibilité et la capacité d'évolution de son outil de production afin de répondre à la demande du marché. Par conséquent chaque usine doit être capable d'assurer la production de nombreux modèles sur une même ligne d'assemblage [1].

Les travaux de cette étude sont menés dans une usine de carrosserie-montage du Groupe Renault. Actuellement, ce site de production fabrique 3 modèles de véhicules différents avec une cadence de production de l'ordre de 30 à 60 véhicules par heure. Comme choisi par de nombreux grands constructeurs automobiles [2], l'approvisionnement de pièces à la ligne d'assemblage est réalisé par kitting. Cela signifie que le processus d'assemblage est fourni avec des collections de composants et/ou de sous-ensembles à différents endroits de la chaîne, afin de supporter une ou plusieurs opérations d'assemblage pour un produit donné.

Nous étudions les flux d'approvisionnement de pièces à la zone kitting en question, la constitution des kits dans la zone et la livraison de ces kits depuis la zone kitting à la ligne de montage.

L'approvisionnement de pièces à la zone kitting comporte le transfert des pièces depuis la gare routière de l'usine jusqu'aux meubles de la zone kitting. Ce processus est assuré par une boucle de deux véhicules à guidage automatique (AGV de Automated Guided Vehicle) tracteurs et par trois opérateurs équipés de cars à fourches. Ensuite, au sein de la zone kitting, il y a une deuxième boucle d'AGV qui transporte les kits qui y sont

constitués par des opérateurs, au fur et à mesure que l'AGV avance dans la zone. Puis, ces AGV transportent les kits jusqu'à la ligne de montage des portes. Tout cela en suivant la séquence de production prédéfinie dans un environnement industriel dynamique et avec une forte présence d'opérateurs et d'engins mobiles.

Dans ce contexte où un site de production automobile doit être capable de fabriquer différents modèles sur la même ligne d'assemblage avec une forte cadence de production, un nombre élevé de composants de véhicules, un volume de production évolutif, et où le nombre de moyens et systèmes impliqués dans le processus d'approvisionnement de pièces à la ligne de montage est important, la logistique interne des usines automobiles est rendue complexe et est sujette à l'apparition de perturbations fréquentes.

Afin de garantir une bonne performance de l'ensemble du processus logistique de livraison du bon kit, au bon endroit et au bon moment pour le processus d'assemblage, tous les systèmes impliqués dans le processus (caristes, AGVs, systèmes d'information) doivent interagir et communiquer entre eux et avec les opérateurs concernés.

L'objectif de cet article est de proposer une architecture permettant de modéliser le processus logistique d'approvisionnement en composants de la chaîne de montage d'un site de fabrication automobile comme un système multi-agent. De cette manière, les techniques d'apprentissage multi-agents et d'intelligence collective peuvent être appliquées pour garantir la performance globale du processus ainsi que pour faire face aux perturbations qui peuvent survenir au cours du processus.

Ce papier est organisé de la façon suivante : la section 2 présente les origines des systèmes multi-agents et ses applications. La section 3 propose une architecture

permettant de modéliser le système d'étude comme un système multi-agent. La section 4 montre les interactions actuelles et souhaitées du système d'étude. Finalement, la dernière section présente les conclusions des travaux effectués et des suggestions pour les travaux futurs.

## 2. ETAT DE L'ART

L'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) a pour objectif de résoudre des problèmes dans des domaines où plusieurs entités ou individus sont physiquement ou logiquement distribués en termes d'information, d'expertise ou de ressources [3]. La résolution des problèmes de cette nature implique le partage et l'échange de plusieurs avis. L'IAD a principalement trois axes de travail : l'IA parallèle, la résolution coopérative de problèmes et les systèmes multi-agents.

Les systèmes multi-agents sont des systèmes composés d'agents autonomes ayant des objectifs individuels qui sont en interaction dans un même environnement. Ces agents peuvent coopérer ou entrer en conflit pour atteindre leurs propres objectifs [4]. Des défis actuels tels que la conduite automatisée, le contrôle distribué des feux de circulation et la coordination de grands essaims de robots, ainsi que les applications web comme Wikipedia, Amazon et YouTube ont une nature distribuée et impliquent des degrés élevés d'incertitude [5]. Ainsi, les agents modélisant ces systèmes doivent prendre en compte des environnements dynamiques et changeants. Afin de résoudre ce type de problèmes, ils doivent apprendre de manière autonome à partir de l'expérience [6]. Grâce au travail sur ces applications, l'IA a progressivement changé d'orientation, passant de la tentative de reproduire l'intelligence humaine à l'augmentation des capacités humaines [7].

Nombreuses sources de la littérature mentionnent que les systèmes multi-agents sont utilisés dans un grand nombre de domaines et de types d'applications. [8, 9] présentent deux revues systématiques de la littérature. Dans la première, les auteurs analysent 152 applications de systèmes multi-agents publiées entre 2000 et 2012. Dans la seconde, 279 articles publiés entre les années 2009 et 2016, dont 194 étaient des applications sont étudiés. Ces études permettent de constater que le nombre de secteurs d'activité (22) couverts par les publications est considérable. Cependant les secteurs de la logistique et la production industrielle, les télécommunications, la défense et l'aérospatial restent les principaux utilisateurs des systèmes multi-agents.

Un autre élément pertinent que ces revues révèlent, c'est qu'uniquement 22,56% des articles analysés présentent des cas d'études réels et que les 77,44% restants ne présentent que des simulations, évaluations ou des comparaisons à travers des cas d'études contrôlés. En outre, 82% de ces études ont été menées par le secteur académique, alors que des études coopératives entre l'industrie et l'académie se limitent à 16% et celles sans présence de l'académie à 6%. Ainsi, la création des liens entre l'académie et l'industrie est nécessaire pour

augmenter le nombre d'applications réelles dans le domaine des systèmes multi-agents.

En regardant des publications plus récentes, il est possible de remarquer que les algorithmes les plus avancés et les plus sophistiqués dans ce domaine se trouvent dans les jeux vidéo. Des jeux populaires comme cache-cache [10] et capture the flag, développés respectivement par Open AI et Deepmind [11], en sont des exemples. Une application similaire peut être trouvée dans [12] où les algorithmes d'apprentissage par renforcement sont implémentés dans un contexte de jeu de Polo.

En ce qui concerne les applications dans le domaine industriel, nous pouvons trouver deux branches différentes : les systèmes multi-agents homogènes et les systèmes multi-agents hétérogènes. La première concerne les systèmes composés de plusieurs agents ayant les mêmes caractéristiques et des objectifs similaires. Dans ce cas, nous pouvons trouver des applications comme le contrôle robotique mobile [13] et la contextualisation en robotique coopérative [14]. D'autre part, la seconde concerne les systèmes composés d'agents, où chaque agent a des caractéristiques différentes des autres agents. L'utilisation de systèmes multi-agents dans ce contexte permet de traiter des problèmes tels que l'ordonnancement en ligne dans les usines intelligentes [15] et l'organisation de systèmes de production reconfigurables [16], [17]. De même, nous pouvons trouver l'utilisation de systèmes multi-agents pour détecter des anomalies dans plusieurs processus dans l'industrie, comme il est présenté dans [18].

En conclusion, nous pouvons voir que la problématique abordée dans cet article appartient au domaine des systèmes multi-agents hétérogènes. Plus précisément, en considérant les attributs des systèmes impliqués dans le processus et en se basant sur la classification des agents proposée par Nwana [19], ces travaux traitent avec des agents intelligents : les opérateurs de l'usine et des agents collaboratifs : les machines physiques.

En complément, aucune étude considérant l'application des techniques des systèmes multi-agents dans une zone de picking kitting d'un processus industriel n'a été trouvée. Par conséquent, nous proposons une architecture pour appliquer des techniques d'apprentissage multi-agents et d'intelligence collective afin de garantir une bonne performance de l'ensemble du processus logistique de fourniture de composants au processus d'assemblage dans une usine Renault. Les sujets couverts par les papiers [16], [17] et [18] sont une source d'inspiration pour la proposition présentée dans la section suivante.

## 3. PROPOSITION D'ARCHITECTURE

La livraison des pièces depuis les zones de préparation des kits jusqu'à la chaîne de montage implique plusieurs acteurs et systèmes. Si l'on considère qu'un agent intelligent est une entité capable de détecter son environnement, de prendre des décisions et d'effectuer des actions en fonction de ses objectifs [20], parmi la

variété d'agents impliqués dans le processus logistique étudié, seuls les opérateurs, c'est-à-dire les êtres humains, répondent à cette définition. D'autres entités comme les AGV, les robots, les cars à fourches ou les systèmes d'informations, ont un programme fixe qu'ils doivent respecter. Si un événement non prévu dans leur programme survient, ils ne sont pas en mesure de prendre des décisions ou de proposer des solutions pour y faire face. Les humains, en revanche, en sont capables.

Sur la base de l'architecture mentionnée dans [18], des expériences précédentes d'installation de systèmes impliquant l'intelligence artificielle dans le domaine industriel et connaissant la méfiance envers ce type de systèmes, nous proposons l'architecture suivante dans le but d'implémenter des techniques d'intelligence collective et d'apprentissage multi-agent pour faire face aux perturbations ou événements inattendus.

L'architecture est présentée dans la Figure 1. Elle est composée de trois niveaux. Le premier niveau, en bas de la figure, représente le niveau du processus de production, les agents du domaine industriel. Le deuxième niveau est appelé le niveau de proposition de solution. Il s'agit de la représentation numérique du premier niveau. Chaque agent du premier niveau a son agent numérique dans le deuxième niveau. Enfin, le troisième niveau est le niveau de décision. Ici, un agent est chargé de centraliser toutes les informations envoyées par chaque agent du deuxième niveau et de communiquer aux opérateurs la décision prise pour faire face à la perturbation.

### 3.1. Niveau du système de production

Ce niveau est composé des systèmes physiques impliqués dans la livraison des kits à la chaîne de montage. Ils peuvent être classés en deux groupes :

- Agents non intelligents : bases roulantes, robots de kitting, AGVs, kits de pièces, pièces, emballages de pièces, palettes de pièces.
- Agents intelligents : opérateurs de la zone de stock, conducteurs des cars à fourches (caristes), opérateurs de préparation des commandes de kits.

### 3.2. Niveau de proposition de solution

Ce niveau est composé d'agents intelligents virtuels, où chaque agent représente un agent physique. Ses fonctions sont les suivantes :

- La collecte de données : chaque agent virtuel traite et surveille les données générées par chaque agent physique dans le processus de production. Les données sont également transmises à l'agent central. Ainsi, ces agents sont appelés agents collecteurs de données.
- Réaction face à une perturbation : lorsqu'une perturbation survient ou est prédite, chaque agent peut proposer une solution basée sur ses propres connaissances et objectifs. La solution est ensuite transmise à l'agent central.

### 3.3. Niveau de prise de décisions

La capacité d'un groupe d'agents à coopérer pour résoudre des problèmes importants et complexes, où chacun apporte une contribution indépendante, est définie comme l'intelligence collective [21]. Le rôle de l'agent central virtuel est de collecter les contributions des agents virtuels et puis de les exploiter.

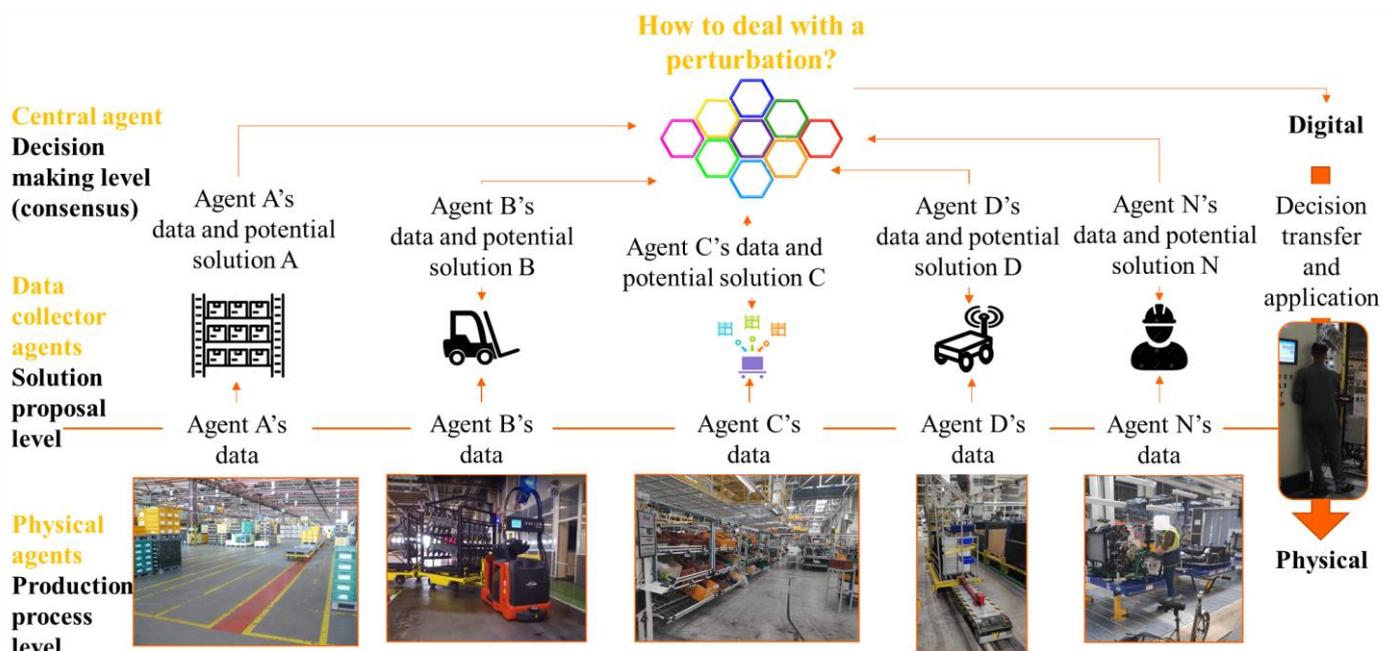


Figure 1 – Architecture multi-agent proposée

Il reçoit toutes les données collectées par les agents collecteurs. Sa fonction est de détecter s'il y a un comportement anormal dans les données. Si une anomalie est détectée, l'agent central doit identifier la cause, considérer toutes les propositions de solution et sélectionner la plus adéquate. Ensuite, la décision est communiquée aux opérateurs physiques.

### 3.4. Transfert et application de la décision

Pour mettre en œuvre la décision prise à travers les trois niveaux précédents, une activité additionnelle est nécessaire : **le transfert et l'application de la décision** (Figure 1 à droite). Un point clé de cette architecture est l'importance des opérateurs industriels sur le terrain. Ils sont les agents intelligents de notre contexte industriel, ils peuvent percevoir leur environnement, prendre des décisions et réaliser des actions. De plus, grâce à leur expérience, ils ont une grande connaissance du terrain industriel.

Ainsi, dans notre proposition, les opérateurs sont les agents qui vont recevoir les propositions faites par l'agent central et les évaluer en fonction de leur expérience. Une fois les propositions validées, les opérateurs vont effectuer les actions nécessaires sur un ou plusieurs agents, pour ajuster le comportement du système physique. De cette manière, nous nous assurons que la proposition mise en œuvre soit bénéfique pour le processus industriel et nous gagnons progressivement la confiance des opérateurs industriels sur le système.

## 4. MODELE SYSTEME MULTI-AGENTS

Les couples agent physique-agent virtuel composant l'architecture présentée par la Figure 1 permettent de faire des ensembles d'agents intelligents capables d'interagir. La Figure 2 illustre le fonctionnement actuel du système d'étude, les agents impliqués et leurs interactions. Dans ce cas, les agents Pièces, Emballages, Palettes et Kits sont complètement passifs et ne prennent aucune initiative. Ils sont juste transportés et manipulés par les opérateurs et les AGVs. Également, la gestion des alertes et des perturbations est effectuée uniquement par les opérateurs de la zone de kitting.

La Figure 3 présente le fonctionnement souhaité du système en utilisant les ensembles intelligents. Ici, grâce aux ensembles intelligents agent physique-agent virtuel, les pièces, les emballages et les kits, au lieu d'être uniquement des éléments à transporter deviennent des agents actifs ayant des connaissances telles que les niveaux de stocks de chaque référence de pièce ou la composition et la position géographique de chaque kit. De cette manière, les interactions avec ces agents pourraient être plus riches. En outre, des nouveaux liens entre ces agents et d'autres agents dans le système peuvent être envisagés. Ainsi, dans le cadre du fonctionnement souhaité, les alertes et les perturbations ne seraient pas communiquées qu'aux opérateurs de la zone de kitting mais aussi aux autres agents impliqués dans le système, de cette façon, ils pourraient proposer des solutions pour

ou faire face. La Figure 4 montre un exemple d'un tel fonctionnement. Dans ce cas, le kit A informe l'agent global qu'il a une pièce manquante. L'agent global lance une requête auprès des autres kits pour savoir quel kit possède une pièce de la même référence que la pièce manquante. Après recevoir la réponse des autres kits, l'agent global informe le kit A quel kit pourrait lui fournir la pièce et demande à l'opérateur de la zone de kitting de mettre une pièce supplémentaire dans le kit N.

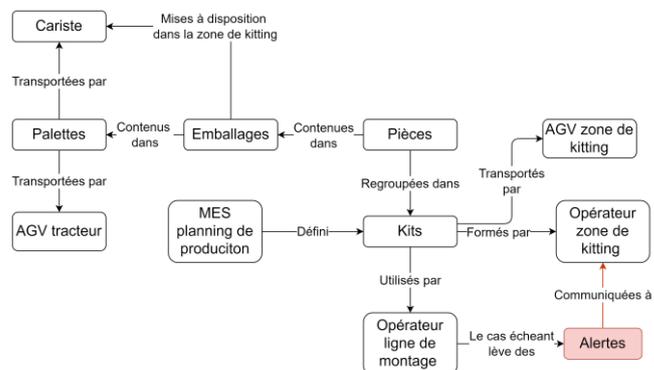


Figure 2 Fonctionnement actuel du système d'approvisionnement de pièces à la ligne de montage de véhicules

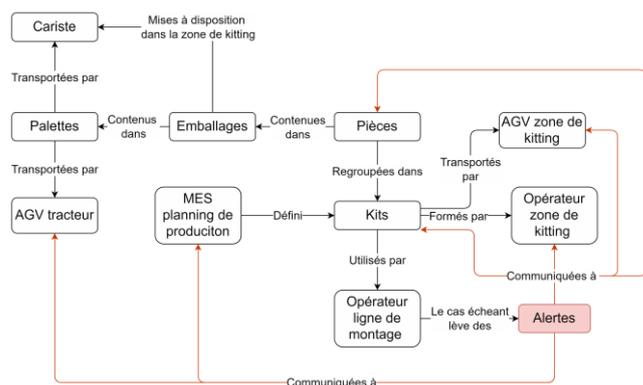


Figure 3 Fonctionnement souhaité du système d'approvisionnement de pièces à la ligne de montage de véhicules

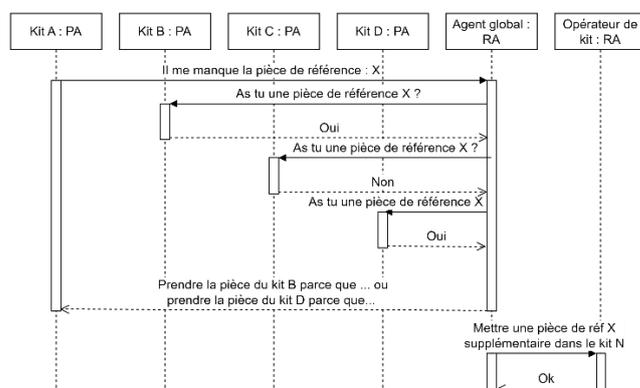


Figure 4 Diagramme d'interaction entre plusieurs kits et l'agent global pour le cas d'une pièce manquante dans un kit

## CONCLUSION

Cet article présente une architecture pour modéliser le processus d'approvisionnement de pièces à la ligne de montage d'un site de fabrication automobile comme un système multi-agents hétérogènes. L'état de l'art proposé en Section 2 permet de vérifier la pertinence des systèmes multi-agents pour représenter des systèmes de nature distribuée où plusieurs entités sont en interactions dans un environnement dynamique, comme le système d'étude. Afin de garantir une bonne performance globale du processus logistique, une approche d'intelligence collective a été considérée pour la conception de l'architecture. Également, la Section 4 du papier présente les interactions actuelles et souhaitées entre les agents impliqués dans le système étudié pour réagir aux perturbations ayant lieu pendant le processus.

Les travaux futurs se concentreront sur le développement du modèle présenté en Section 4, le but étant d'enrichir et d'augmenter les interactions actuelles entre les agents impliqués dans le processus. Ces nouvelles interactions permettront d'aider les agents physiques à gérer les aléas de production. En vue de valider les solutions proposées, un protocole expérimental sera développé. Il sera basé sur des données extraites de situations réelles du processus logistique. Ce protocole pourra être utilisé pour comparer les solutions proposées par notre modèle avec d'autres modèles qui sont dans la littérature ou qui seront développés ultérieurement et éventuellement contribuer à des initiatives de plateformes comme celle présentée en [22].

## REMERCIEMENTS

Ce travail est issu d'une thèse CIFRE accordée par le laboratoire LISPEN des Arts et Métiers et le département IF&A du Groupe Renault. Cette recherche est, également, partiellement sponsorisée par des fonds FEDER à travers le programme COMPETE - Programa Operacional Factores de Competitividade - et par des fonds nationaux à travers FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, sous le projet UID/EMS/00285/2020.

## Références

- [1] Beauville dit Eynaud, A., Klement, N., Gibaru, O., Roucoules, L., Durville, L.: Identification of reconfigurability enablers and weighting of reconfigurability characteristics based on a case study. *Procedia Manufacturing*. 28, 96–101, 2019.
- [2] Brynzér, H., Johansson, M.I.: Design and performance of kitting and order picking systems. *International Journal of Production Economics*. 41, 115–125, 1995.
- [3] Alonso, E.: AI and agents: State of the art. *AI Magazine*. 23, 25–29, 2002.
- [4] Tuyls, K., Weiss, G.: Multiagent learning: Basics, challenges, and prospects. *AI Magazine*. 33, 41–52, 2012.
- [5] Verbraeken, J., Wolting, M., Katzy, J., Kloppenburg, J., Verbelen, T., Rellermeyer, J.S.: A Survey on Distributed Machine Learning. *ACM Comput. Surv.* 53, 1–33, 2020.
- [6] Weiss, G.: *Multiagent Systems*. MIT Press, 2013.
- [7] Singh, V.K., Gupta, A.K.: From artificial to collective intelligence: Perspectives and implications. Presented at the Proceedings - 2009 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SACI 2009, 2009.
- [8] Müller, J.P., Fischer, K.: Application Impact of Multi-agent Systems and Technologies: A Survey. In: Shehory, O. and Sturm, A. (eds.) *Agent-Oriented Software Engineering: Reflections on Architectures, Methodologies, Languages, and Frameworks*. pp. 27–53. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [9] Falco, M., Robiolo, G.: A Systematic Literature Review in Multi-Agent Systems: Patterns and Trends. In: 2019 XLV Latin American Computing Conference (CLEI). pp. 1–10, 2019.
- [10] Baker, B., Kanitscheider, I., Markov, T., Wu, Y., Powell, G., McGrew, B., Mordatch, I.: Emergent Tool Use From Multi-Agent Autocurricula. arXiv:1909.07528 [cs, stat], 2020.
- [11] Jaderberg, M., Czarnecki, W.M., Dunning, I., Marris, L., Lever, G., Castañeda, A.G., Beattie, C., Rabinowitz, N.C., Morcos, A.S., Ruderman, A., Sonnerat, N., Green, T., Deason, L., Leibo, J.Z., Silver, D., Hassabis, D., Kavukcuoglu, K., Graepel, T.: Human-level performance in 3D multiplayer games with population-based reinforcement learning. *Science*. 364, 859–865, 2019.
- [12] Movahedi, Z., Bastanfard, A.: Toward competitive multi-agents in Polo game based on reinforcement learning. *Multimed Tools Appl.* 80, 26773–26793, 2021.
- [13] Tigli, J.Y., Thomas, M.C.: Use of multi agent systems for mobile robotics control. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. pp. 588–592 vol.1, 1994.
- [14] Hortúa, F., Amaya, D., Ramos, O.: Contextualization in cooperative robotics. *International Journal of Applied Engineering Research*. 11, 7446–7455, 2016.
- [15] Zhou, T., Tang, D., Zhu, H., Zhang, Z.: Multi-agent reinforcement learning for online scheduling in smart factories. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 72, 2021.
- [16] Beauville dit Eynaud, A., Klement, N., Roucoules, L., Gibaru, O., Durville, L.: Framework for the design and evaluation of a reconfigurable production system based on movable robot integration. *Int J Adv Manuf Technol*, 2021.
- [17] Amzil, K., Yahia, E., Klement, N.: Causality learning approach for supervision in the context of Industry 4.0. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. p. 8. Springer, 2021.
- [18] Mateos, N.: Multi-agent system for anomaly detection in Industry 4.0 using Machine Learning techniques. *ADCAIJ: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*. 8, 33, 2019.
- [19] Nwana, H.S.: Software agents: an overview. *The Knowledge Engineering Review*. 11, 205–244, 1996.
- [20] Wooldridge, M.: *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons, 2009.
- [21] Mannes, A.E., Larrick, R.P., Soll, J.B.: The social psychology of the wisdom of crowds. In: *Social judgment and decision making*. pp. 227–242. Psychology Press, New York, NY, US, 2012.
- [22] Piquié, R., Duigou, J.L., Grimal, L., Roucoules, L.: An open science platform for benchmarking engineering design researches. *Procedia CIRP*. 109, 472–477, 2022.



# Un cadre basé sur les scénarios du futur au service de la simulation multi-agents de la mobilité urbaine de demain

T. Gall <sup>a,b,\*</sup>, T. Chouaki <sup>a,b</sup>, B. Yannou <sup>a</sup>, F. Vallet <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire Genie Industriel, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 3 Rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, France

<sup>b</sup> IRT SystemX, 660 Rue Noetzlin, 91190 Gif-sur-Yvette, France

\* e-mail : tjark.gall@urban-framework.com

## 1. INTRODUCTION

Concevoir des solutions pour des systèmes complexes de mobilité urbaine présente de nombreux défis pour les praticiens. L'un des plus importants est de disposer d'informations nécessaires pour concevoir des solutions qui prennent du temps pour aller du stade de l'idée au marché (p. ex., véhicules motorisés), ou des solutions qui vont rester fonctionnelles pendant une longue période (p. ex., lignes de métro). Dans cet article, nous posons donc la question « Comment considérer des *incertitudes futures* et *tendances* dans la SMA de la mobilité ? »

De nombreuses solutions existent déjà pour répondre aux défis de la mobilité urbaine, tels que la pollution, l'accessibilité inégale, l'impact négatif sur le bien-être physique, l'économie locale, ou les matériaux rares [1-4]. Il s'agit notamment de solutions technologiques, telles que les voitures électriques, et d'approches sociales, telles que des campagnes et des politiques publiques visant à encourager la mobilité active ou à convaincre les automobilistes d'utiliser les transports en commun. Cependant, la sélection et la conception détaillée de telles solutions, ainsi que l'adaptation à un contexte local, restent difficiles. Souvent, la question est de savoir quelles solutions sont les plus efficaces, lesquelles privilégier (c'est-à-dire dans lesquelles investir) ou quels sont les effets systémiques négatifs potentiels. Ces questions gagnent en importance dans la conception à moyen (5-10 ans) et à long terme (10 ans et plus).

Notamment, une compréhension des futurs utilisateurs, tel que leur nombre, leurs caractéristiques et leurs préférences, est essentielle pour prendre des décisions de conception adéquates aujourd'hui. Pour les modéliser, différentes méthodes ont été développées. Nous avons choisi de travailler avec la simulation multi-agent (SMA) car, par rapport à d'autres, elle permet 1) d'incorporer des individus en tant qu'agents avec des profils et des préférences de mobilité variés, et 2) de

modéliser le système de mobilité urbaine sur une période de temps avec une interaction de différents modes et composants de système. La SMA permet de modéliser les interrelations des systèmes de mobilité urbaine et de tester l'impact des solutions futures. Par exemple, une simulation peut permettre de déterminer combien de personnes pourraient faire le choix de prendre les transports en commun, combien d'émissions de gaz à effet de serre (GES) seraient évitées ou combien de personnes vivraient une meilleure accessibilité si un service spécifique était mis en place, comme l'ouverture d'une nouvelle ligne de métro.

Même si les simulations de la mobilité actuelle deviennent de plus en plus précises [5], il reste des défis à relever pour modéliser de manière robuste les futurs systèmes de mobilité, notamment en termes d'intégration des tendances futures et des incertitudes futures. Les scénarios du futur ont un fort potentiel d'opérationnalisation des tendances et incertitudes futures pour la conception et la prise de décision. Cependant, les scénarios dominent plutôt dans les approches d'immersion et d'idéation. Si nous pensons aux scénarios quantitatifs existants, tels que les scénarios d'émissions du GIEC [6] ou les scénarios de mobilité du Gouvernement français [7], ceux-ci sont avant tout issus de modélisations technico-économiques. Ces scénarios ne mettent pas en avant le travail avec les incertitudes futures.

D'autre part, les approches qualitatives ont jusqu'à présent peu été intégrées dans les simulations. Répondant à ce défi, nous développons une approche appliquée à une étude en collaboration avec la Communauté d'Agglomération Paris-Saclay (CPS) et le secteur privé. Cet article présente les grandes lignes de cette méthode. Il s'agit d'un travail en cours et les résultats présentés ici sont préliminaires.

## 2. ETAT DE L'ART

Cette section présente les trois éléments-clés de l'étude et de l'approche développée. Le premier paragraphe décrit les particularités de la conception de solutions dans le contexte de systèmes complexes, tandis que le second introduit les approches de conception à base de scénarios, suivi par des principes de base des SMA.

### 2.1. Conception de solutions pour les systèmes complexes

La conception de solutions pour les systèmes complexes est un domaine qui implique la création et l'optimisation de structures organisées et interconnectées [8]. Cela peut inclure des éléments tels que des infrastructures, des réseaux et des processus. La clé de la conception de systèmes complexes réside dans la compréhension des relations entre ces différents éléments et comment ils peuvent fonctionner ensemble de manière efficace et adaptée aux divers besoins.

Un des défis majeurs de la conception de systèmes complexes est de garantir que tous les éléments du système fonctionnent de manière cohérente et qu'il n'y a pas d'effets inattendus. Cela nécessite des analyses approfondies et des simulations pour tester différentes configurations et trouver celle qui offre les performances en cohérence avec les objectifs. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons au système de mobilité urbaine (Fig. 1) défini comme un système urbain complexe et sociotechnique [9].

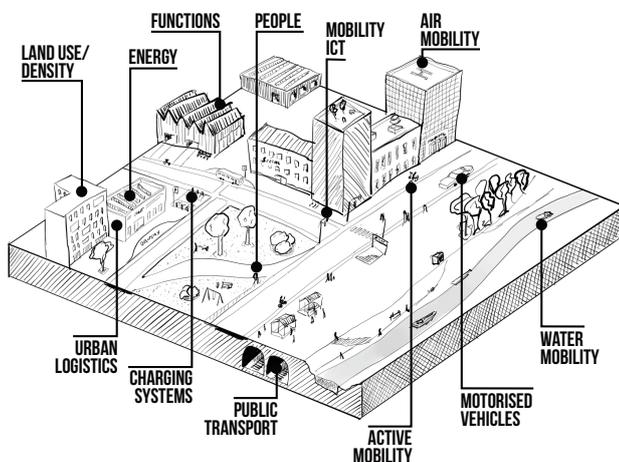


Figure 1 : Visualisation du modèle de système de mobilité urbaine

Le système est constitué principalement d'infrastructures, de véhicules, de services de mobilité, d'usagers, mais aussi d'éléments moins tangibles comme l'environnement numérique.

### 2.2. Conception basée sur des scénarios

Les scénarios font partie d'une gamme d'outils qui permettent de travailler stratégiquement avec de multiples futurs possibles. Spaniol et Rowland [10] définissent les caractéristiques clés des scénarios : comme ayant une propriété temporelle enracinée dans le futur, font référence à des forces externes dans ce contexte

et estiment que les scénarios doivent être possibles et plausibles tout en prenant la forme d'une histoire ou d'une description narrative. En plus, les divers scénarios coexistent dans un ensemble et constituent des alternatives significativement différentes [10]. Plus spécifiquement, nous nous référons aux scénarios exploratoires qui montrent différents futurs alternatifs à envisager dans le présent, par rapport à des scénarios normatifs ou prédictifs [11]. L'avantage comparatif de travailler avec des scénarios du futur par rapport à d'autres méthodes est que la création de scénarios est un exercice stimulant pour explorer différentes possibilités qui pourraient se dérouler à l'avenir. Cela peut être particulièrement utile pour l'idéation, la conception et la planification de solutions futures, telles que de nouveaux produits, services ou même des politiques de mobilité.

Les scénarios du futur sont généralement fondés sur des tendances et des hypothèses sur l'évolution future de certaines variables clés. Ils prennent en compte des incertitudes futures et des événements imprévisibles qui pourraient avoir un impact sur les développements futurs [12]. Dans le cadre de la mobilité, il existe principalement des exemples des transports de demain [13], immersifs [14] et spatiaux [15]. Pour organiser les incertitudes futures, nous pouvons par exemple créer des scénarios dits « archétypaux » [16]. Miskolczi et al. [17] ont examiné des scénarios pour 2030 et les ont regroupés en quatre scénarios archétypaux : Good-old-Transport, Mine-is-yours, At-an-easy-pace et Tech-eager. Good-old-transport fait référence à la poursuite des tendances actuelles, tandis que Mine-is-yours se concentre sur la diminution de la propriété individuelle et sur un système de servicisation et de partage. At-an-easy-pace décrit une transition durable lente tandis que Tech-eager met l'accent sur les solutions technologiques pour résoudre les problèmes actuels de mobilité urbaine.

Ces types de scénarios du futur peuvent être utilisés pour évaluer les conséquences possibles des différents choix de conception d'aujourd'hui et pour trouver des solutions pour faire face aux défis futurs. Ils peuvent également aider à identifier les opportunités et les menaces susceptibles d'apparaître à l'avenir. Les scénarios du futur sont donc un outil utile pour anticiper les développements futurs et les prendre en compte en conséquence dans les processus de conception.

### 2.3. Simulations de mobilité multi-agents

Il existe différentes manières de modéliser les systèmes de mobilité urbaine et d'aider à la conception de solutions. Une méthode de plus en plus utilisée est la SMA qui simule les choix et actions de tous les individus dans une zone donnée en fonction des diverses interactions. Contrairement à d'autres types de modélisation, où le niveau de granularité, c'est-à-dire le niveau de détail, est trop agrégé, une SMA de mobilité modélise individuellement chaque agent et son comportement.

Par conséquent, nous travaillons avec la SMA car elle permet d'intégrer, entre autres, différents profils de choix, de comportements de mobilité et de ressources (p. ex., voiture, permis de conduire), donc certains des facteurs

centraux de la performance du système de mobilité [18] Une autre contribution majeure de la SMA est que nous pouvons considérer qu'un agent de mobilité réalise plusieurs trajets au cours d'une journée. On peut prendre en compte différentes préférences de choix de mode et l'interaction optimisée entre les choix agrégés de tous les individus dans un environnement vaste et complexe avec de multiples options. Nous utilisons MATSim, un outil adapté à la mobilité pour la SMA, qui est "open source" et combine une modélisation « échelle extrême » [18,19].

Les options que les agents peuvent choisir dépendent de leur emplacement ainsi que de leurs caractéristiques intrinsèques. Par exemple, pour utiliser une voiture, un permis est nécessaire et l'accès à une voiture est requis ; pour être un passager dans une voiture, un membre du ménage avec un véhicule et un horaire de voyage aligné est nécessaire. De plus, les transports publics, la mobilité active et les nouveaux modes tels que la mobilité à la demande [20] peuvent être intégrés comme options de mobilité. Ensuite, chaque agent prend une décision pour chaque déplacement en fonction des paramètres qui impactent le choix. Par exemple, le coût et les ressources financières, le temps qu'il faut ou l'impact négatif aggravé des longs délais d'attente ou de plusieurs changements intermodaux.

Cela peut conduire à des résultats plus précis et réalistes de la façon dont les gens se déplacent par rapport à d'autres approches de la simulation de mobilité. La SMA est donc un outil innovant et utile pour comprendre et améliorer les systèmes de mobilité urbaine, en tenant compte des comportements individuels et des interactions entre les agents. Elle peut être utilisée pour tester différentes versions des systèmes de transport, planifier des transports en commun, optimiser les itinéraires en fonction des besoins des usagers et des contraintes du réseau, ou évaluer l'impact des politiques de mobilité durable sur la congestion et la pollution de l'air. Nous l'utilisons avant tout pour tester l'impact d'une solution future spécifique sur l'ensemble du système ; par exemple quel serait l'impact d'une nouvelle ligne de métro.

### 3. METHODE ET APPLICATION

Dans cette section, nous décrivons la méthodologie proposée pour intégrer les incertitudes futures dans les SMA afin d'améliorer les processus de conception de solutions pour les systèmes de mobilité urbaine. Notre étude est appliquée au contexte de la Communauté d'Agglomération Paris-Saclay (CPS) comprenant 27 communes au sud de Paris, limitrophe de la Métropole du Grand Paris (Fig. 2). Sa particularité réside en la différence entre les zones nord très urbanisées et les zones agricoles rurales du sud ; le plateau de Saclay en altitude est traditionnellement difficile d'accès. C'est un projet d'intérêt national qui abrite de plus en plus d'universités, de centres technologiques et d'entreprises. Le métro 18, l'une des lignes de métro du Grand Paris Express (GPE) qui est le plus grand projet d'infrastructure

européen, vise à relier les zones périphériques autour de Paris sans nécessiter de transiter par le centre [21].

Dans ce contexte, les enjeux de mobilité s'étendent au déplacement d'un nombre croissant d'étudiants et d'employés vivant plus loin, tout en accompagnant la transition des comportements des habitants, de l'usage de la voiture vers des modes plus durables, ainsi qu'en ciblant la déconnexion historique des zones périurbaines vers les opportunités économiques et services de base situés dans des zones plus centrales.

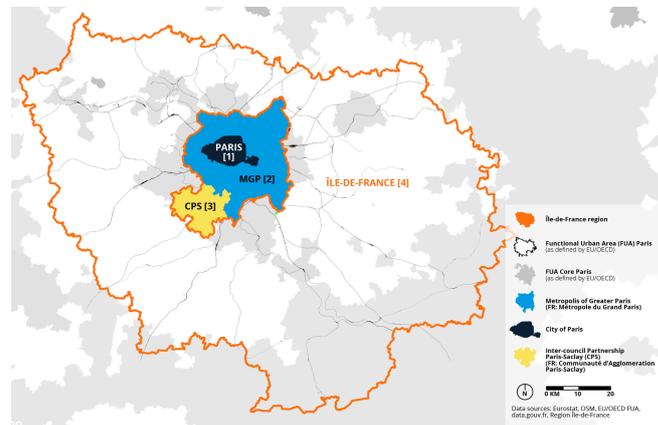


Figure 2 : Zone d'étude (jaune) dans le contexte de la région Ile-de-France (orange), de la Métropole du Grand Paris (bleu clair) et de la ville de Paris (bleu foncé)

Pour cette application, nous explorons l'impact d'une intervention particulière : les Véhicules Électriques Partagés Autonomes (VÉPA) en tant que service de mobilité à la demande, visant à permettre aux ménages ruraux et périurbains d'accéder aux transports en commun existants (Réseaux Express Régionaux (RER) B et C) et en projet (métro 18, tram 12) dans la région. Le but est d'utiliser la SMA pour tester quel serait l'impact du service en 2030 couplé avec la nouvelle offre de transport en commun. Les scénarios sont ajoutés pour tester la robustesse des solutions et explorer leur potentiel.

La méthode développée se compose de cinq étapes (Fig. 3). Tout d'abord, et en parallèle, 1) un jeu de scénarios du futur localisés sur la zone d'étude est créé ainsi que 2) une simulation de base pour la zone étudiée. Dans l'étape suivante, 3) les scénarios sont traduits en informations quantitatives qui peuvent alimenter les simulations. Ensuite, 4) les simulations de scénarios sont effectuées. Enfin, 5) les sorties quantitatives sont utilisées pour compléter les scénarios initiaux.

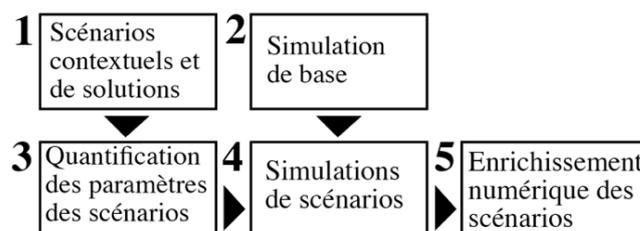


Figure 3 : Diagramme de processus de méthode

### 3.1. Cas d'application

Les paragraphes suivants décrivent chacune des étapes de l'application de notre méthode dans ce contexte. Nous mettons un accent particulier sur l'étape 3 car c'est la principale nouveauté de l'approche développée. Pour chacune des autres étapes, nous fournissons des références supplémentaires pour une description méthodologique plus détaillée.

#### Étape 1 : Création des scénarios du futur

Dans un premier temps, nous créons les scénarios de mobilité urbaine en contexte. Nous utilisons pour cela quatre scénarios archétypaux pris comme base [17]. Ceux-ci sont adaptés au contexte local à l'aide de la littérature comprenant des rapports et des plans locaux, d'un ensemble de 16 entretiens d'experts et de plusieurs ateliers d'experts dans lesquels des méthodes de conception collaborative ont permis d'extraire les connaissances intégrées spécifiques à la localité. Cela nous permet d'avoir un ensemble de quatre scénarios qui sont des alternatives distinctes les uns des autres, constitués de descriptions qualitatives, de visuels, de localisation via des cartes et d'autres éléments immersifs, ainsi que de certaines informations quantitatives supposées, telles que l'impact d'émissions de GES par personne.



Figure 4 : Photo de l'atelier d'experts sur la localisation de scénarios archétypaux de mobilité urbaine dans le contexte du plateau

#### Étape 2 : Simulation multi-agent de base

Une étape simultanée et préalable à la simulation de scénarios futurs est la SMA dans les conditions actuelles. Pour cela, il est nécessaire de construire une population d'agents artificiels qui est représentative de la population en termes de caractéristiques de mobilité, dite population synthétique. Dans nos travaux, plusieurs sources de données socio-économiques sont utilisés. Notamment le recensement [22], l'enquête sur la mobilité des personnes [23] et différents ensembles de données spatiales et liées au transport.

Pour le cas d'application de VÉPA, nous avons plusieurs paramètres que nous pouvons utiliser pour l'optimisation comme, par exemple, le nombre de véhicules, l'endroit où

ceux-ci sont stationnés en début de journée, comment et quand ils sont rechargés, où ils se déplacent entre les trajets, etc. En plus, il faut définir la façon dont l'optimisation globale est effectuée. Des indicateurs peuvent être l'accessibilité (p. ex., augmenter le pourcentage de la population qui peut accéder à 10% du marché du travail en moins que 30 minutes sans utiliser de véhicules privés), l'impact environnemental (moyenne des émissions GES par personne en fonction de voyageurs-kilomètres selon les modes) et critères économiques (pourcentage du revenu dépensé pour la mobilité). Pour des descriptions plus détaillées de la population et de la SMA de base, voir [5] et [24].

#### Étape 3 : Quantification des paramètres des scénarios et transfert aux entrées de la simulation

Cette étape est la plus importante : traduire les scénarios en paramètres spécifiques. Nous pourrions potentiellement travailler avec un ensemble presque infini de paramètres tirés des scénarios. Cependant, l'objectif est de s'adapter au SMA. Nous nous limitons donc aux paramètres pouvant être pris en compte dans la simulation. Nous pouvons distinguer trois catégories d'informations évolutives, issues d'un travail continu de modélisation de la mobilité urbaine en tant que système sociotechnique (Fig. 1) : les personnes, les services et les infrastructures. En lien avec les scénarios, cela se traduit par une approche d'adaptation progressive des différentes composantes du système de mobilité urbaine à différents scénarios (Fig. 5).

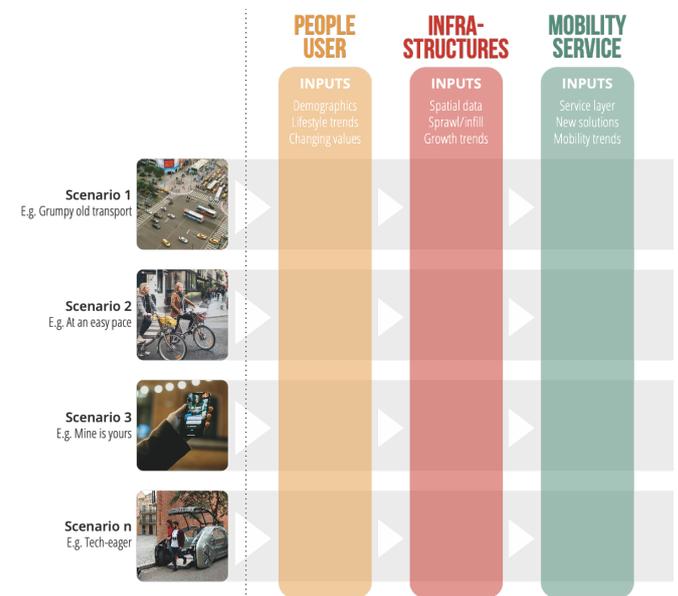


Figure 5 : Extrait de méthode d'utilisation de scénarios et modèle de système à trois couches pour adapter la mobilité urbaine aux situations futures

Concernant les personnes, nous utilisons une approche par persona pour adapter les populations synthétiques qui sont une des entrées du SMA. 28 personas sont générés à partir des données d'aujourd'hui et ensuite repondérés dans les différents scénarios pour intégrer les tendances et les incertitudes futures [voir référence 24]

pour la méthode détaillée]. Il en résulte une taille de population différente selon l'emplacement, ainsi qu'une constellation différente de celle-ci. Par exemple, dans un scénario, il y a plus de personnes qui préfèrent prendre les transports en commun qu'un autre mode. De plus, leurs ressources peuvent varier. Par exemple, on a une probabilité réduite ou accrue de posséder une voiture personnelle selon le scénario. Enfin, le modèle de choix peut varier. Par exemple, nous pouvons intégrer les valeurs environnementales en augmentant la préférence pour des modes durables par rapport aux autres modes, ou en diminuant la valeur du coût ou du temps dans le processus de prise de décision.

Ensuite, l'infrastructure peut être adaptée aux hypothèses concernant l'endroit où les gens vivraient et travailleraient à l'avenir, entre autres. Cela peut signifier, par exemple, d'étendre le réseau routier, de densifier les zones déjà développées ou d'adapter les usages mixtes entre les quartiers en fonction du scénario et de l'hypothèse sous-jacente aux principes d'urbanisme et de conception (comme la ville de 15 minutes, qui fait actuellement partie de la politique publique parisienne).

Enfin, le service de mobilité peut être adapté en fonction des hypothèses précédentes aux évolutions population/usagers et infrastructures. D'une part, il y a des changements qui sont censés se produire pour tous les scénarios (voir tendances). Dans le cas de Paris-Saclay, cela signifie que chacun des scénarios intègre la présence du métro 18 et du tram 12. Cependant, pour les différents scénarios, nous pouvons supposer la variabilité, par exemple, des horaires et des itinéraires de bus variables ou encore des offres de services de mobilité à la demande.

#### Étape 4 : Simulation des scénarios

Dans cette étape, la simulation des différents scénarios est répétée en utilisant l'outil MATSim comme décrit à l'étape 2. La principale différence est l'entrée de différents paramètres qui résultent de la troisième étape. Dans notre étude de cas, cela signifie que nous avons une augmentation des agents à travers les scénarios, mais aussi des poids différents des divers profils selon le scénario. En outre, certains des scénarios conduisent à un développement urbain plus dense, tandis que d'autres conduisent à un développement moindre. Enfin, les agents prennent des décisions différentes selon le scénario, en tenant compte des caractéristiques potentiellement modifiées décrites dans la section précédente, tels que la préférence pour un mode par rapport à un autre, les ressources disponibles ou l'évolution du poids de paramètres tels que les coûts ou le confort.

La création de quatre SMA pour 2030 nous permet d'avoir une représentation large et multidimensionnelle des états futurs possibles et plausibles du système de mobilité urbaine, en tenant compte des tendances et des incertitudes futures et de leur impact sur le système local. Dans une deuxième sous-étape du SMA, le service de mobilité à la demande de VÉPA décrit précédemment pour alimenter les transports publics peut être testé et

calibré pour chacun des scénarios. Il en résulte un ensemble d'indicateurs caractérisant l'impact. Par exemple, combien de passagers-kilomètres en moins par personne sont conduits en voiture si la même taille et la même configuration de flotte sont mises en œuvre dans tous les scénarios. Cela nous permet 1) de réaliser un test de robustesse des produits et services plus développés pour les situations futures et 2) de tester comment les différentes tendances et incertitudes futures, agrégées en scénarios, influencent l'utilité d'un service donné.

#### Étape 5 : Enrichissement quantifié de scénarios

Dans la dernière étape, les scénarios contextuels sont alimentés par les sorties numériques des simulations. Sans indiquer de valeurs numériques réelles, la Figure 6 fournit un exemple de visualisation possible pour les divers scénarios.

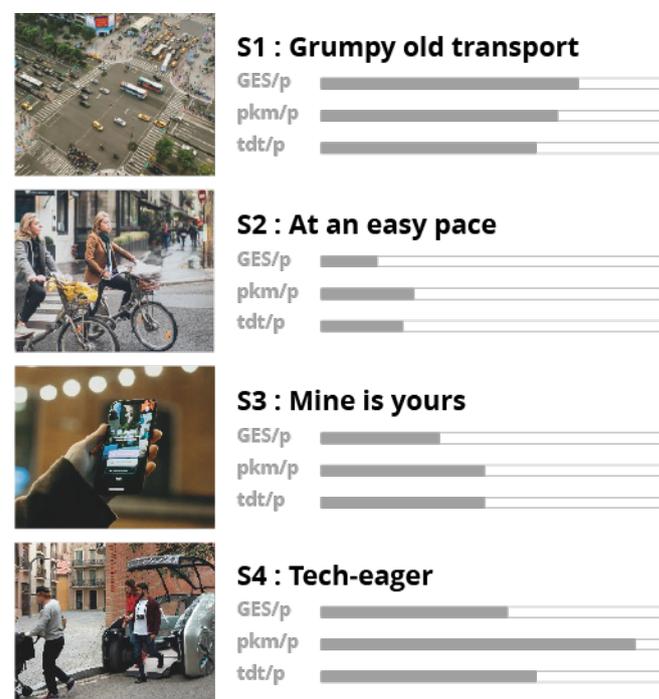


Figure 6 : Exemple de visualisation enrichie de scénarios (pkm/p : passagers-kilomètres moyens par personne, tdt/p : temps de trajet moyen par personne)

#### 4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous avons pour intention de trouver de nouvelles façons de mieux concevoir des solutions « prêtes pour l'avenir » en utilisant des SMA, alimentées par des entrées en provenance de scénarios futurs, créés qualitativement dans un contexte local spécifique. Dans le dernier paragraphe, nous avons proposé une méthodologie qui tire avantage de deux méthodes traditionnellement déconnectées et identifie les moyens par lesquels celles-ci peuvent s'alimenter mutuellement. Nous avons testé l'approche dans le cadre d'une conception de solution de VÉPA à Paris-Saclay à échelle de temps de près d'une décennie (horizon 2030). La méthode, bien qu'encore en phase d'expérimentation, montre que la SMA pour la conception de solutions futures peut être rendue plus

robuste grâce à l'utilisation de scénarios. Les premiers résultats et discussions avec des experts en mobilité, simulation et urbanisme et des utilisateurs potentiels ont suscité des réactions fortement positives, conduisant entre autres à une réplique dans le contexte de la zone métropolitaine du Caire. Ainsi, bien qu'une validation plus approfondie reste à opérer, nous avançons que l'approche proposée n'a, à notre connaissance, pas été appliquée de manière aussi structurée et peut donc contribuer à la conception de solutions pour des systèmes complexes en cette période d'incertitude croissante concernant l'avenir.

Il reste des limites sur lesquelles nous travaillons actuellement, et qui semblent inhérentes à la démarche. Premièrement, l'avenir est inconnu, donc tout travail sur celui-ci est soumis à de nombreuses hypothèses. Nous ne nions pas cela, mais proposons plutôt une méthode de travail intégrant plusieurs futurs alternatifs pour augmenter les chances de concevoir des systèmes mieux adaptés à différentes facettes de l'avenir. En outre, toute approche quelque peu fiable pour élaborer des scénarios futurs se fonde sur des études qualitatives, des compilations de tendances et des contributions d'experts. Comme il n'existe aucun moyen quantitatif de mesurer le futur, il s'agit d'une limitation qu'il n'est pas possible d'éviter. Enfin, les simulations, y compris celles basées sur des agents, ne sont que des représentations abstraites de la réalité, donc présentant des limites. Pourtant, il s'agit actuellement d'un modèle proche du fonctionnement réel du système de mobilité urbaine, ce qui, associé à un ensemble de scénarios futurs quantitatifs, peut nous aider aujourd'hui à concevoir des solutions plus satisfaisantes et « prêtes pour demain ».

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le gouvernement français dans le cadre du programme « France 2030 » à l'Institut de Recherche Technologique SystemX. Les auteurs expriment leur gratitude aux participants des ateliers et aux partenaires de la Chaire Anthropolis. Nous remercions les trois relecteurs pour leurs commentaires détaillés et constructifs.

## REFERENCES

- [1] CDC (2020) Road Traffic Injuries and Deaths – A Global Problem. <https://www.cdc.gov>
- [2] Cebr (2014) The future economic and environmental costs of gridlock in 2030. An assessment of the direct and indirect economic and environmental costs of idling in road traffic congestion to households in the UK, France, Germany and the USA. Centre for Economics and Business Research (Cebr).
- [3] Climate Watch (2020) Historical GHG Emissions. <https://www.climatewatchdata.org>
- [4] Metabolic (2019) Metal Demand for Electric Vehicle: Recommendations for fair, resilient, and circular transport systems, Amsterdam: Metabolic.
- [5] Hörl, S. et Balac, M. (2021) Synthetic population and travel demand for Paris and Île-de-France based on open and publicly available data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 130, 103291. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103291>
- [6] IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- [7] CGEDD (2022) Prospective 2040-2060 des transports et des mobilités. 20 ans pour réussir collectivement les déplacements de demain. Rapport de Synthèse, février 2022.
- [8] Le Moigne, J.-L. (1990) *La modélisation des systèmes complexes*. Paris : Dunod.
- [9] Geels, F. W. (2011) The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 1, pp. 24-40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- [10] Spaniol, M. J. et Rowland, N. J. (2019) Defining scenario. *Futures Foresight Science*, 1:e1. <https://doi.org/10.1002/ffo2.3>
- [11] Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T. et Finnveden, G. (2006) Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, Vol. 38/7, pp. 723-739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- [12] Gall, T., Vallet, F. et Yannou, B. (2021) How to visualise futures studies concepts: Revision of the futures cone. *Futures*, 143/103024. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103024>
- [13] Banister, D. et Hickman, R. (2013) Transport futures: Thinking the unthinkable. *Transport Policy*, Vol. 29, pp. 283-193. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.07.005>
- [14] Futura Mobility (2021) Prospective scenarios for 2030. <https://futuramobility.org/en/prospective-scenarios/>
- [15] Pucci, P. (2021). Spatial dimensions of electric mobility – Scenarios for efficient and fair diffusion of electric vehicles in the Milan Urban Region, *Cities*, Vol. 110/103069. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103069/>
- [16] Dator, J. (2019) What Futures Studies Is, and Is Not, in: Jim Dator: A Noticer in Time. *Anticipation Science*, Vol. 5, Cham: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-17387-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-17387-6_1)
- [17] Miskolczi, M., Földes, D., Munkácsy, A. et Jászberényi, M. (2021) Urban Mobility Scenarios until the 2030s. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 72/103029. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103029>
- [18] Burmeister, B., Haddadi, A. et Matylis, G. (1997) Application of multi-agent systems in traffic and transportation. *IEE Proceedings – Software*, 144/1. <https://doi.org/10.1049/ip-sen:19971023>
- [19] Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinié, P. et O'Hare, G. M. P. (2017) Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, 24, pp. 13-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>
- [20] Chouaki, T., Hörl, S. et Puchinger, J. (2022) Implementing reinforcement learning for on-demand vehicle rebalancing in MATSim. The 13th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT), Mar 2022, Porto, Portugal. pp. 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.03.020>
- [21] Société du Grand Paris (2023) Grand Paris Express, le nouveau métro. <https://www.societedugrandparis.fr>
- [22] INSEE (2021) Recensement de la population. Individus localisés au canton-ou-ville en 2018. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5542859>
- [23] EMP (2021) Résultats détaillés de l'enquête mobilité des personnes de 2019. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/resultats-detailles-de-lenquete-mobilite-des-personnes-de-2019>
- [24] Gall, T., Hörl, S., Vallet, F. et Yannou, B. Integrating future trends and uncertainties in urban mobility design via data-driven personas and scenarios. [prépublication, à paraître]

# Comment favoriser la transition vers l'industrie 4.0 dans le secteur textile-habillement : étude de cas du déploiement d'un cobot au sein de l'entreprise Petit Bateau

A. Bernar <sup>a,b\*</sup>, C. Prevot <sup>b</sup>, J. Legardeur <sup>c</sup>, H. Chanal <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Université de Bordeaux, Collège des écoles doctorales, 351 cours de la Libération, 33405 Talence cedex

<sup>b</sup> Petit Bateau, 15 Rue du Lieutenant Pierre Murard, 10000 Troyes

<sup>c</sup> ESTIA, Technopole Izarbel 90 Allée Fauste d'Elhuyar, 64210 Bidart

<sup>d</sup> Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

\* e-mail : amandabernar@rocketmail.com

## 1. INTRODUCTION

Depuis les années 1960, les industriels français du textile et de l'habillement déplacent leurs outils de production vers les pays en voie de développement pour réduire les prix de revient [21]. En effet, le coût de production dans ces pays étant beaucoup moins élevé que dans les pays développés, un nouveau schéma d'organisation est apparu. Ce schéma suit une logique centrale/périphérique de maintien des activités nobles à valeur ajoutée en France et de déplacement des activités bas de gamme vers les pays tiers [3][21]. Qu'il s'agisse de la migration d'une partie des activités à l'étranger ou de l'arrêt complet des usines, de nombreuses entreprises et de nombreux emplois ont disparu en raison de la délocalisation textile [3]. En termes d'avance technologique, l'industrie textile n'a pas évolué comme les autres secteurs de l'économie en raison de ce phénomène de délocalisation [3][8].

Plus récemment, les diverses crises du XXI<sup>ème</sup> siècle, en incluant la crise de la pandémie de COVID-19, ont fragilisé les chaînes de valeur mondiales et ont relancé les débats sur leur résilience et la nécessité de réorienter les activités à des échelles régionales ou nationales [1].

Le coût de la main-d'œuvre a été l'une des principales raisons qui ont conduit à la délocalisation de la production textile. Ce coût de production est le défi qu'il faut relever aujourd'hui pour que ce secteur puisse à nouveau se développer localement et proposer une production de proximité [8]. A ce jour, la problématique de la relocalisation textile en France est d'abord liée à

l'incapacité du réseau textile local à produire des quantités plus importantes [13].

Confrontées à une pression concurrentielle constante, les industriels cherchent à développer des produits et services innovants, ou de nouvelles manières de les fabriquer, ce qui impose une évolution des compétences de leurs équipes [26]. Dans ce cadre, les technologies 4.0 viennent en soutien pour améliorer l'efficacité de la production et des opérations de maintenance, diminuer les coûts de production, améliorer la qualité et la personnalisation des produits, réduire la pénibilité et les Troubles Musculosquelettiques (TMS) et gagner le pari de la compétitivité et de la relocalisation [20][27].

Petit Bateau est une entreprise de fabrication intégrée, c'est-à-dire qui réalise l'ensemble de la chaîne de production en interne (tricotage, teinture, ennoblement et confection). Depuis 2019, l'entreprise a décidé de miser sur les technologies de l'Industrie 4.0 pour devenir elle-même une industrie du futur. L'objectif est d'augmenter la production réalisée localement sans augmenter, en retour, la charge de travail des salariés. Petit Bateau a investi dans des projets pilotes tels que le renouvellement des technologies et l'automatisation de certaines activités de son atelier de confection. C'est dans ce contexte que l'entreprise a mis en place l'une des technologies les plus récentes de l'4.0, un robot collaboratif que l'on nomme généralement « cobot ».

Cet article présente une analyse de cas d'introduction d'un cobot qui pourra être utilisée par les organisations manufacturières pour une transition réussie de la fabrication traditionnelle vers l'Industrie 4.0.

## 2. INDUSTRIE 4.0 ET COBOTIQUE

Selon Xu et al. (2018) l'un des principaux objectifs de l'industrie 4.0 est la mise en place de coopération entre machines et humains. Les cobots permettent des interactions humain-machine dans le secteur manufacturier [16][26]. Ils représentent une nouvelle génération de robots industriels ne nécessitant pas d'enceinte de protection [2][16]. Équipés de capteurs, les cobots sont capables de s'arrêter immédiatement lorsqu'ils rentrent en contact avec des humains ou un objet [16]. Cela en fait des moyens de production très fiables au niveau sécurité au travail, par rapport aux robots industriels standards [6][16].

Même si les technologies 4.0 sont souvent intégrées pour augmenter l'efficacité, la compétence et la compétitivité face aux concurrents [30], il ne faut pas négliger le facteur humain associé [2]. Ainsi, Longo et al. (2017) affirme que l'Industrie 4.0 est plus facilement mise en place grâce à un processus d'évolution incrémentale dont les principales dimensions sont l'automatisation et l'intelligence : le produit, la machine et l'opérateur sont des paradigmes centraux. Pour Longo et al. (2017), au fur et à mesure que l'industrie 4.0 prend forme, les opérateurs humains doivent effectuer des tâches quotidiennes de plus en plus complexes. Selon Kadir & Broberg (2020), la réaction des humains aux nouvelles technologies et principalement la résistance aux changements sont des facteurs essentiels pour la réussite de l'implémentation de l'Industrie 4.0. Ainsi, les cobots doivent être acceptés par les opérateurs.

Selon Heerink et al. (2009) l'acceptation de la technologie, la non-adaptabilité des utilisateurs et les influences sociales restent des questions délicates. Pour mesurer cette acceptation, Heerink et al. (2009) ont créé un modèle de questionnaire qui prend en compte le sentiment humain lors de l'utilisation des technologies. Les auteurs ont proposé des questions pour analyser : l'anxiété (les réactions anxieuses lors de l'utilisation du système), l'intention d'utilisation (intention déclarée d'utiliser le système sur une plus longue période), l'adaptabilité (capacité perçue du système à s'adapter aux besoins changeants de l'utilisateur), le plaisir (sentiments de joie ou de plaisir associés par l'utilisateur à l'utilisation du système), l'influence sociale (perception de l'utilisateur de l'opinion des personnes qui sont importantes pour lui ont de lui en utilisant le système), la confiance (croyance que le système fonctionne de façon sûre et fiable) et l'usage (utilisation réelle du système sur une plus longue période).

Cette étude vient compléter les conseils de Longo et al. (2017) pour réussir un projet qualifié Industrie 4.0 avec la mise en place d'une gestion de projet pour sécuriser chaque étape et en maîtriser toutes les dimensions : humaine, organisationnelle et technique. Longo et al. (2017) a proposé une approche intégrative afin de permettre aux ressources humaines de devenir le centre de gravité de l'Industrie 4.0 basé sur des exigences ciblées : 1) Fournir aux opérateurs des retours en temps réel et des contenus de réalité augmentée sur l'exécution

des tâches/procédures afin de minimiser les risques d'accidents et de soutenir leur formation ; 2) Fournir aux opérateurs un assistant numérique personnel compétent avec lequel interagir afin d'obtenir des données, des informations ou des connaissances sur les composants, les machines, les tâches, les procédures et les processus.

Ces deux exigences principales utilisées par Longo et al. (2017) ont servi d'inspiration pour créer une façon propre d'intégration adaptée à l'environnement industriel et aux ressources humains de Petit Bateau. L'objectif était de soutenir les opératrices de confection en fournissant la formation appropriée sur l'utilisation du cobot et les informations qui ne sont généralement pas disponibles : la productivité associée, les opérations de maintenance prévues, les avertissements sur les dangers et les risques susceptibles de se produire et, bien sûr, des suggestions sur la manière d'augmenter la productivité. Pour ce faire, un questionnaire inspiré par l'étude d'Heerink et al. (2009) mais adapté à Petit Bateau a été développé. A la suite du questionnaire, une présentation du système a été faite. Les résultats de la méthodologie utilisée sont présentés dans la section suivante.

## 3. ETUDE DE CAS

Selon Ito et al. (2021), une résistance humaine existe lors de l'implémentation et de l'utilisation d'une nouvelle technologie. Le succès de la transformation technologique dépend directement de la façon dont les entreprises font face à ces problématiques. Ainsi, deux tiers des projets d'intégration de nouvelles technologies n'aboutissent pas à cause de la résistance humaine au changement [14]. Kadir & Broberg (2020) soutiennent que le succès d'implémentation d'une nouvelle technologie dépend du processus mené par l'entreprise depuis l'introduction jusqu'à l'utilisation. Les utilisateurs doivent comprendre comment les nouvelles technologies s'intègrent à leurs tâches et routines de travail et recevoir une assistance sur la manière d'utiliser et de travailler avec. Si les nouvelles technologies ne répondent pas aux besoins des utilisateurs, ceux-ci pourraient finir par s'en détourner. Si la phase d'adaptation n'est pas bien faite, les utilisateurs peuvent présenter une certaine résistance à la nouvelle technologie, en l'utilisant d'une manière non prévue ou en ne l'utilisant pas du tout [15].

Dans cette optique, Petit Bateau a décidé de mettre l'humain au cœur de sa transformation 4.0. Ainsi, le premier cobot de l'entreprise a été acheté comme un outil de démonstration et d'apprentissage. Tout d'abord, le but était de sensibiliser les opératrices de confection et de les familiariser avec la nouvelle technologie pour, une fois l'acceptation confirmée, être envisagé comme un outil de productivité. Pour atteindre cet objectif, certaines étapes ont été suivies.

### 3.1. Réception du cobot et présentation au personnel

Le cobot a été choisi par Petit Bateau comme un atout pour rester compétitive, améliorer la productivité et possiblement la qualité des produits dans un futur

proche. Pour cela, l'entreprise a acheté un bras robotisé 6 axes Universal Robots – UR5. Ce cobot est capable de supporter une charge utile de 5kg. Les principaux facteurs pour ce choix ont été la programmation intuitive, la forte polyvalence et les possibilités d'extensions et outils [30].

Depuis son arrivée, le cobot a été mis à proximité de tous dans l'atelier de confection. Cela a eu pour but favoriser l'adhésion des opératrices à la technologie sans leur imposer de changement dans leurs habitudes de travail. Les premières configurations et réglages du cobot ont été réalisées par le personnel interne au regard de tous. Une fois la phase de test terminée, le cobot a été présenté au cadre directeur et présidentiel de la société.

Ces étapes d'implémentation ont été réfléchies comme une première mesure qualitative d'acceptation inspirée de l'étude d'Heerink et al. (2009). L'objectif principal était d'une part de créer un lien de présence sociale lors de l'interaction avec le système et d'autre part, vérifier l'intérêt porté par les employés à l'utilisation du cobot selon leur niveau d'interaction avec les équipes chargées de sa mise en œuvre. En outre, nous avons aussi réussi à noter les premières réactions d'anxiété des opératrices de confection, traduisant par une peur fondée sur l'historique de perte d'emploi dans l'industrie textile française. Toutefois, malgré l'appréhension générée par ce premier contact, nous avons pu créer un lien social et démontrer l'utilité ainsi que sa facilité d'utilisation du système.

### 3.2. Définition du besoin et mise en place d'un poste automatisé

Après la mise en service et la prise en mains du cobot, nous avons mené une analyse sur les opportunités d'automatisation de l'atelier de confection. Nous nous sommes premièrement focalisés sur les postes à faible valeur ajoutée ou répétitifs qui n'ont pas besoin d'expertise de confection. Selon Biétry & Creusier (2015), les facteurs de bien-être au travail sont directement liés au sentiment d'efficacité personnelle, de satisfaction ressentie à l'égard des tâches accomplies et de sentiments d'engagement. Les postes à faible valeur ajoutée ne s'intègrent pas à ses définitions et ont alors été ciblés comme facteurs de mal-être au travail. Nous avons donc choisi le poste de coupe des ceintures des caleçons boxers (Figure 1). Ce poste chronophage et répétitif était susceptible de générer des TMS à plus long terme.

Bien que l'UR5 soit un robot collaboratif, nous avons décidé, dans un premier temps, d'automatiser complètement l'opération de coupe. L'objectif était de tester l'acceptabilité de cette nouvelle technologie, et d'augmenter la confiance des utilisateurs (intégrité personnelle et fiabilité) avant de proposer l'interaction humain-machine. Le poste automatique est constitué du cobot, d'un système mécanique de distribution d'élastique, d'un système de coupe et de capteurs infrarouge pour vérifier la présence d'élastique dans le distributeur. L'opération était réalisée suivant les étapes : 1) Positionnement de la bobine d'élastique dans le système de distribution ; 2) Mise en route du cobot (renseignement des quantités et des tailles à produire) ;

3) Exécution du programme (actionnement d'un vérin au niveau du distributeur, saisie de l'élastique, déplacement du bras dans l'axe pour la mesure de taille, actionnement de la coupe, dépose de l'élastique coupé dans un bac). L'opération s'effectuait sans interruption tant que le capteur détectait la présence d'élastique et jusqu'à ce que la quantité renseignée auparavant soit atteinte.

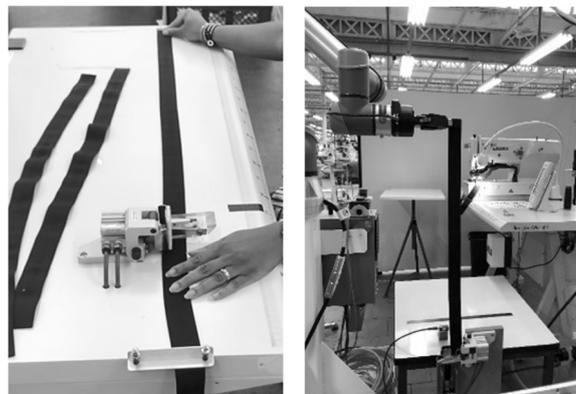


Figure 1 - Ancien poste de coupe vs poste de coupe automatique

Nous avons aussi comparé la qualité de coupe obtenue ainsi que la fiabilité des mesures de taille de l'élastique entre les postes manuel et automatique. Pour le poste manuel, l'opératrice responsable a coupé 100 ceintures de la taille L (81 cm) et 100 ceintures de la taille XL (87 cm). Les tailles ont été choisies par rapport au besoin journalier de la confection et nous avons chronométré le temps. La même opération a été reproduite fidèlement avec le cobot. A la fin de chaque production, nous avons contrôlé 100% des ceintures.

Lors de la coupe manuelle, nous avons pu comptabiliser un nombre important de défauts et de non-conformité de taille. Quand la ceinture n'est pas correctement coupée et qu'elle doit être corrigée au moyen de ciseaux, nous générons un défaut. La non-conformité de taille, en revanche, signifie que la mesure diffère de plus ou moins 1cm par rapport à la mesure standard. Le chronométrage a été réalisé sur des lots de 75 ceintures afin de cadencer cette production avec le rythme de la confection. Les résultats comparatifs des deux mesures sont présentés dans la Figure 2.

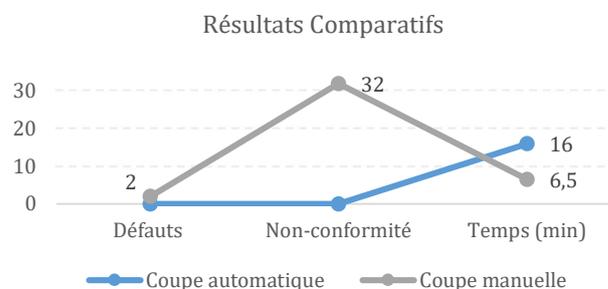


Figure 2 - Résultats coupe manuelle vs coupe automatique

Ces résultats ont démontré que la qualité de la coupe est considérablement améliorée avec le poste automatique. Cependant le temps pour effectuer la même opération avec le poste manuel est 2,4 fois plus rapide. Cela est dû au fait qu'un cobot fonctionne plus lentement

qu'un robot industriel du fait des contraintes de sécurité [29].

Ces résultats nous ont mené à définir la prochaine étape du projet : le poste collaboratif. L'idée était d'unifier les deux opérations qui étaient jusqu'alors réalisées séparément et par deux personnes : l'opération de coupe d'élastique et l'opération de couture de l'élastique (couture transversale pour fermeture en bracelet). Un poste collaboratif a été envisagé car l'opération de couture est complexe et demande plus de temps que l'opération de coupe. De cette façon, le cobot aurait le temps de couper les ceintures en temps masqué pendant que l'opératrice réalise les opérations de couture à ses côtés.

### 3.3. Analyse de charge mentale et questionnaire d'acceptation

Petit Bateau souhaite mettre l'humain au centre de l'industrie pour son virage 4.0, raison pour laquelle nous avons décidé d'étudier les impacts humains d'un tel changement avant de mettre en place un poste collaboratif. Selon Neumann et al. (2021), il existe encore aujourd'hui une inattention aux humains dans la transformation 4.0 [24]. Les auteurs ont donc proposé un guide systématique, qui peut être utilisé dans tous les secteurs industriels et pour toutes les technologies adoptées, pour considérer le facteur humain depuis la conception du projet jusqu'à son implémentation. Ce guide est appliqué en 5 étapes : 1) Définition de la technologie ; 2) Identification du personnel affecté ; 3) Identification des scénarios possibles ; 4) Analyse des tâches et des impacts associés ; 5) Conclusion de l'analyse.

Dans cette étude de cas, la technologie choisie (le cobot) était définie à l'avance. Par conséquent l'étape 1 consistait basiquement à définir les caractéristiques de cette technologie (un cobot qui exécute un travail collaboratif avec un humain afin d'effectuer les tâches répétitives et d'améliorer la qualité des produits (coupe et couture de la ceinture) et les objectifs futurs du projet (supprimer un poste de travail répétitif, améliorer l'efficacité du poste suivant et le respect des mesures). L'étape 2 était l'identification des personnes qui interagiront avec le cobot en tenant compte de leurs attentes et de la pérennité des performances du dispositif dans l'éventualité où il y aurait désaffection de la part du personnel. Les personnes concernées par ce projet au sein de Petit Bateau sont : 1) les opératrices de confection ; 2) l'ingénieur chef de projet et, 3) le personnel de la maintenance.

L'étape 3 était l'identification des scénarios possibles. Pour chacun d'entre eux nous avons étudié les tâches ajoutées (par exemple, la supervision du cobot par l'opératrice dans le poste collaboratif) et les tâches supprimées (par exemple, le travail répétitif de coupe). Cette étape permet d'évaluer l'évolution et les changements apportés aux activités actuelles lorsque le personnel utilise cette nouvelle technologie. Selon Neumann et al. (2021), en raison de la nature de ces changements, la performance du système dans son ensemble peut être influencée [24]. Dans l'analyse menée

sur le poste collaboratif chez Petit Bateau, les changements sont plutôt simples et acceptables quant à l'introduction de la nouvelle technologie proposée.

L'étape suivante consistait à évaluer l'impact de ces changements pour les opérateurs. Pour chaque changement de tâche identifié à l'étape 3 - qu'il s'agisse de l'élimination ou de l'adjonction de nouvelles tâches - une évaluation des exigences imposées aux personnes en termes de système perceptif, cognitif et moteur a été faite. La mise en œuvre des nouvelles technologies et les changements de tâches inhérents sont souvent la cause de facteurs de stress psychosociaux au travail. Pour vérifier cet aspect, une enquête et une évaluation plus approfondies peuvent être nécessaires [24]. Pour le poste collaboratif, nous avons constaté un maintien de l'effort perceptif, une réduction de l'effort cognitif et une augmentation de l'effort de prise de décisions du côté de l'opératrice de confection. En complément, elles auront besoin d'une formation pour élargir leur savoir-faire qui, maintenant, inclut aussi le contrôle d'un cobot. Le cobot permet la réduction de l'effort physique mais génère une augmentation de l'effort psychosocial. A la fin de l'analyse, même si les effets secondaires sont susceptibles d'augmenter (la fatigue visuelle, la fatigue mentale, le stress et le déconfort), la performance du système sera impactée uniquement dans le cas extrêmes d'absentéisme et d'arrêt maladie causés par l'impact humain. Ce sont donc des facteurs qu'il faudra gérer lors de l'utilisation du cobot à temps complet.

Dans l'étape 5, nous avons évalué les effets possibles des impacts humains (identifiés à l'étape 4) sur les performances du système en termes économiques. En particulier, nous avons repéré un besoin de formation et, dans les cas extrêmes, l'augmentation des coûts dus aux arrêts maladie. En revanche, la suppression d'un poste de travail est très rentable comme nous verrons ensuite.

En conclusion, nous pouvons dire que le poste collaboratif ne génère aucun risque pour les humains qui l'utiliseront. Toutefois, il est nécessaire de mettre en place une analyse continue du bien être des opératrices travaillant avec le cobot parce que la charge mentale sera plus élevée que sur le poste manuel actuel. Etant donné que l'ingénieur et le personnel de maintenance n'interviennent que ponctuellement sur le cobot et sur le poste de travail associé, le cobot n'aura que peu d'incidence sur leur travail. Dans ce cas, les facteurs humains associés n'ont pas besoin d'un suivi à long terme. Toutefois, le personnel technique doit s'assurer que les conditions de sécurité sont respectées lors de ses interventions.

#### 3.3.1. Questionnaire et protocole utilisé

En amont de l'analyse de charge mentale, inspirés par les travaux de Heerink et al. (2009), nous avons développé deux questionnaires (anonymes) afin de comprendre le ressenti des opératrices de confection vis à vis du cobot. L'envie était non seulement d'évaluer les réactions d'anxiété quant à l'utilisation du cobot mais aussi de créer un lien entre les opératrices de confection et le cobot. Le questionnaire a été développé sur un ton

amical, en référençant le cobot comme un nouveau collègue arrivé chez Petit Bateau et comme une solution pour réduire la pénibilité et la répétitivité au travail. Des précautions ont été prises pour qu'il ne soit pas perçu comme une technologie mise en place pour réduire les emplois, ce qui n'est pas le but, mais plutôt comme une envie concrète de conscientiser le personnel sur le potentiel de la cobotique. Par exemple, nous avons demandé aux opératrices de personnaliser le cobot et choisir un prénom pour ce nouveau salarié : le prénom de « Jorge » a remporté le plus de votes (pour le premier cobot de l'entreprise). Selon certains psychiatres [28], l'humain n'évolue pas aussi vite que les machines mais, s'il existe une relation de confiance entre la machine et l'opérateur, l'acceptation est plus vite concrétisée.

Le premier questionnaire a été appliqué sans aucune présentation du poste automatique pour connaître les a priori des employés et mesurer le degré de connaissance des opératrices sur la cobotique. Ensuite, nous avons mené une présentation sur mesure du poste automatique, présenter le cobot et ses systèmes, et générer la confiance nécessaire pour l'interaction humain-cobot dans un poste collaboratif.

La première étape de cet événement concernait la réponse au premier questionnaire. Ensuite, chaque groupe (environ 15 personnes par groupe) se déplaçait jusqu'au poste automatique pour assister à la présentation. La démonstration était suivie d'explications, de démonstration sur la sécurité du cobot en cas de choc avec une personne et la démonstration du travail automatique de coupe des élastiques. A la fin de la présentation, le deuxième questionnaire était distribué.

Les deux questionnaires ont été proposés à 87 des employés du service de confection présents sur une période d'une seule journée. Le premier questionnaire a reçu 100% de réponses et le deuxième a reçu un total de 75 réponses (86,21%) dont 4 n'ont pas été prises en compte car inexploitable.

Quelques questions identiques ont été posées dans les deux questionnaires avec l'objectif d'évaluer les changements de perspective et la compréhension du sujet après la présentation. C'est le cas de la question « Pensez-vous que le cobot pourrait vous blesser physiquement ? ». Avant la présentation seulement 39% des personnes ont répondu que le cobot ne pouvait pas les blesser. Après la présentation, le pourcentage a augmenté à hauteur de 92% mettant ainsi en évidence un gain de confiance vis-à-vis du système. Une autre question qui a eu des résultats très satisfaisants après la présentation est « Seriez-vous prêt à mener des missions où le cobot intervient pour vous aider ? ». Dans le premier questionnaire, nous avons eu à peine 30% de réponses positives. Après la présentation, nous avons seulement deux réponses possibles (oui ou non). 76% des opératrices ont répondu qu'elles étaient prêtes à mener des missions collaboratives avec ce cobot. Ce résultat fortement positif a été le facteur déterminant pour la mise en place du poste collaboratif.

### 3.4. Le poste collaboratif et les résultats économiques

Après avoir validé le fait que le poste collaboratif n'apporterait aucun risque vis à vis des facteurs humains, nous avons placé une machine à coudre à côté du cobot et modifié sa programmation pour offrir les élastiques coupés directement à l'opératrice (Figure 3).



Figure 3 - Poste collaboratif

Le poste collaboratif a bien été accepté par le personnel et a été utilisé pour effectuer la totalité de la production des caleçons boxers d'un groupe de confection. Sachant que dans une production exclusivement manuelle, la rentabilité d'une machine doit être calculée en tenant compte du temps alloué à une opération (de confection dans notre cas), une nouvelle analyse de temps a été réalisée pour valider économiquement le poste collaboratif. A noter, que chez Petit Bateau, le nombre d'articles nécessaires à l'obtention d'une analyse fiable est de 18 au minimum. Nous avons donc chronométré les opérations de coupe et de couture de 20 élastiques sans interruption (temps de coupe dans le poste 1, temps de transfert de bac au poste 2 et temps de couture dans le poste 2). Le temps de préparation de la coupe n'a pas été pris en compte ainsi que le temps de transfert de bac au poste 3 (le poste suivant dans la ligne de confection des boxers).

Le temps nécessaire pour effectuer la coupe manuelle de 20 ceintures est de 1min et 46s et le temps de transfert plus couture dans le poste 2 est de 4min et 48s. Le temps total de l'opération manuelle de coupe et couture est de 6min et 34s. Au niveau du poste collaboratif la coupe est réalisée en même temps que l'opération de couture et il n'y a pas de transfert de bac entre les deux postes. En revanche, il y a un supplément de quelques secondes au début du cycle pour que le robot réalise son cycle préparatoire permettant d'assurer une coupe droite en production). Le temps global de l'opération avec le poste collaboratif était de 5min et 20s. Cela signifie un gain de 1min et 14s, soit 18% du temps, pour 20 ceintures produites. Ce gain de temps permet d'améliorer la rentabilité de 6% sur chaque article produit. La productivité de ce groupe de confection a également augmenté en 13% grâce à l'utilisation du cobot.

## 4. CONCLUSION

Cet article présente une application du déploiement d'un cobot avec le maintien des humains au centre des changements d'une entreprise du textile. L'analyse de charge mentale nous montre que les efforts perceptifs, cognitifs, physiques, psychosociaux et de savoir-faire d'un poste collaboratif ne sont pas les mêmes que ceux d'un poste manuel en confection. A partir de ces résultats nous avons pu repérer les enjeux et les difficultés rencontrées par les personnes qui travailleront avec cette nouvelle technologie quotidiennement et cette connaissance nous permettra de nous assurer du bien-être du personnel. Le questionnaire d'acceptation a été un facteur déterminant pour la mise en route du poste collaboratif. Les bons résultats du questionnaire nous ont permis de démontrer que la façon de présenter le cobot depuis son arrivée chez Petit Bateau a influencé l'ouverture d'esprit des employées et a contribué au succès du poste collaboratif.

Nos résultats montrent que l'acceptation de la technologie, l'adaptabilité des utilisateurs et les influences sociales restent des questions fondamentales pour réussir la transition vers l'industrie 4.0. Nous avons réduit le temps de production et par conséquent, augmenté la rentabilité des produits, l'efficacité et la productivité du groupe de confection concerné sans perte d'effectif. Les prochaines étapes du déploiement de ce poste collaboratif sont l'accompagnement du bien-être du personnel et la quantification de la charge de travail.

## REFERENCES

- [1] Abdelouahed, B. (2022). La résilience des chaînes de valeur à l'ère du coronavirus The resilience of value chains in the era of coronavirus. 3, 23.
- [2] Adriaensen, A., Costantino, F., Di Gravio, G., & Patriarcar, R. (2022). Teaming with industrial cobots : A socio-technical perspective on safety analysis. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 32(2), 173-198.
- [3] Ammar, G., & Roux, N. (2009). Délocalisation et nouveau modèle économique : Le cas du secteur textile-habillement : La Revue de l'Ires, n° 62(3), 99-134.
- [4] Biétry, F., & Creusier, J. (2015). Le bien-être au travail : Les apports d'une étude par profils. *Relations industrielles*, 70(1), 11-35.
- [5] Butt, J. (2020). A Strategic Roadmap for the Manufacturing Industry to Implement Industry 4.0. *Designs*, 4(2), 11.
- [6] Chowdhury, A., Ahtinen, A., Pieters, R., & Vaananen, K. (2020). User Experience Goals for Designing Industrial Human-Cobot Collaboration: A Case Study of Franka Panda Robot. *Proceedings of the 11th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Shaping Experiences, Shaping Society*, 1-13.
- [7] Crague, G., & Levratto, N. (2022). « Au-delà de la relocalisation de l'industrie : la ville productive », *Métropolitiques*, 10 janvier 2022. URL: <https://metropolitiques.eu/Au-dela-de-larelocalisation-de-lindustrie-la-ville-productive.html>.
- [8] Crouzel, C. (2021). Le casse-tête de la relocalisation de la filière textile en France. *Figaro, Le (Business Section)*, 23934, 22.
- [9] Dais, S. (2014). *Industrie 4.0 - Anstoß, Vision, Vorgehen*, pages 625-634. Springer, 04 2014.
- [10] Drath, R., Horch A. (2014). Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry forum]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2):56-58, June 2014.
- [11] Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Grybauskas, A., Vilkas, M., & Petraitė, M. (2021). Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. 21.
- [12] Heerink, M., Krose, B., Evers, V., & Wielinga, B. (2009). Measuring acceptance of an assistive social robot : A suggested toolkit. *RO-MAN 2009 - The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 528-533.
- [13] Huriez, T. (2019). Re-made en France : 1 million d'emplois près de chez nous en produisant et consommant local ! *Dunod*.
- [14] Ito, A., Ylipää, T., Gullander, P., Bokrantz, J., Centerholt, V., & Skoogh, A. (2021). Dealing with resistance to the use of Industry 4.0 technologies in production disturbance management. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(9), 285-303.
- [15] Kadir, B. A., & Broberg, O. (2020). Human well-being and system performance in the transition to industry 4.0. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 76, 102936.
- [16] Kadir, B. A., Broberg, O., & Souza da Conceição, C. (2018). Designing human-robot collaborations in industry 4.0: explorative case studies. 601-610.
- [17] Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: Final report of the industrie 4.0 working group. Technical report, acatech, 2013.
- [18] Kollros, C. (2021). Comment donner aux PME les moyens de réussir un passage structuré à l'Industrie 4.0 ? Thèse de doctorat en Génie Industriel sous la direction de Mr. Michel Tollenaere. Grenoble, École Doctorale IMEP2, Laboratoire G-Scop, 2021.
- [19] Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2017). Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 144-159.
- [20] Manyika, J., Chui, M., Miremadi, M., Bughin, J., George, K., Willmott, P., Dewhurst, M. (2017). A Future that works: automation, employment and productivity. McKinsey Global Institute. URL: [www.mckinsey.com/mgi](http://www.mckinsey.com/mgi)
- [21] Messaoudi, D. (2015). L'innovation à l'épreuve des délocalisations : Le cas de l'industrie textile en France : *Innovations*, n° 48(3), 211-229.
- [22] Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K.-I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2-17.
- [23] Nascimento, D. L. M., Alencastro, V., Quelhas, O. L. G., Caiado, R. G. G., Garza-Reyes, J. A., Rocha-Lona, L., & Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(3), 607-627.
- [24] Neumann, W. P., Winkelhaus, S., Grosse, E. H., & Glock, C. H. (2021). Industry 4.0 and the human factor - A systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics*, 233, 107992.
- [25] Pellerin, F., & Cahier, M.-L. (2019). Organisation et compétences dans l'usine du futur : Vers un design du travail ? *Presses des Mines-Transvalor la Fabrique de l'industrie*.
- [26] Simonin, J. (2022). Acceptation et intention d'usage des technologies cobotiques dans l'industrie française en 2021. 26.
- [27] Sufian, A. T., Abdullah, B. M., Ateeq, M., Wah, R., & Clements, D. (2021). Six-Gear Roadmap towards the Smart Factory. *Applied Sciences*, 11(8), 3568. <https://doi.org/10.3390/app11083568>
- [28] Tisseron, S., Tordo, F., & Baddoura, R. (2015). Testing Empathy with Robots: A Model in Four Dimensions and Sixteen Items. *International Journal of Social Robotics*, 7(1), 97-102.
- [29] Universal Robots. (2022). Cobot UR5e - Un robot industriel collaboratif polyvalent. URL: <https://www.universal-robots.com/fr/produits/robot-ur5/>
- [30] Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962.

# Acceptation d'un gant d'assistance aux gestes de la main

K. Subrin <sup>a,\*</sup>, E. Jacques-Jean <sup>a</sup>, S. Le Loch <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes, France

\* e-mail : kevin.subrin@ls2n.fr

## 1. INTRODUCTION

L'amélioration des conditions de travail et la prévention des Troubles-Musculo-Squelettiques (TMS) a permis aux exosquelettes de prendre peu à peu leur place en industrie. Ils sont généralement passifs (Figure 1b et 1c) voire actifs (Figure 1a) et permettent d'assurer une assistance aux gestes professionnels [1].



Figure 1 : quelques exosquelettes d'assistance aux gestes : Ironhand (objet de l'étude), SuitX, Ergosquelette de Gobio Robot

Cependant, l'utilisation de tels dispositifs interroge sur leur acceptation. En effet, des essais permettent généralement de l'évaluer positivement mais sur le long terme certains détails peuvent freiner leur acceptation

définitive. Dès lors, ces travaux se focalisent sur une démarche méthodologique appliquée à un gant d'assistance à la préhension d'objets. Nous utilisons les travaux présentés dans Muller et al. 2022 [2] qui ont étudié l'acceptation d'un système passif d'assistance aux gestes pour la manipulation d'objets lourds (quelques dizaines de kilogrammes). L'article se structure de la manière suivante : la section 2 aborde la notion d'acceptation de dispositif et met en avant les principales méthodes. La section 3 présente la méthodologie et les principaux résultats appliqués sur l'IronHand de la société Bioservo. La section 4 se focalise sur les perspectives de recherche à mener.

## 2. ACCEPTATION DE DISPOSITIFS D'ASSISTANCE AUX GESTES

L'évaluation de l'acceptation de dispositifs fait appel à une connaissance approfondie de l'utilisateur dans son environnement. Elle mobilise généralement une analyse de la personnalité mais également de son comportement [3]. Ces études sont statistiques et réalisées à travers un questionnaire faisant appel à des échelles de mesure de la littérature évaluées dans le cadre d'études qualitatives (entretien semi-directif). Ces questionnaires permettent d'établir des dimensions en effectuant des opérations algébriques sur les résultats des différentes questions, ce qui permet d'attribuer un score à chacune des caractéristiques de l'interaction. Chaque question est évaluée au moyen d'une échelle de Likert à cinq ou sept points où le répondant doit se positionner sur l'affirmation en cochant un degré d'accord pouvant aller de « Fortement en désaccord » à « tout à fait d'accord ». L'usage est d'avoir une échelle impaire pour permettre des réponses neutres et ainsi rester dans une approche « scientifique ». Parmi les échelles de mesure les plus reconnues pour les systèmes cobotiques (contraction des mots 'collaboration' et 'robotique') sont le questionnaire Godspeed pour les interactions homme-robot, RULA pour l'évaluation rapide du positionnement des membres supérieurs de l'humain, TAM pour l'acceptation de la

technologie ou encore SART pour la mesure de l'impact de la technologie sur l'homme visant l'évaluation de la conscience de la situation.

La méthode RULA a été conçue pour permettre l'analyse des contraintes subies par les membres supérieurs d'un travailleur à des fins de dépistage des risques de TMS. La méthode TAM quant à elle évalue trois variables essentielles : la facilité d'utilisation, l'utilité perçue (PU) et l'intention comportementale d'utilisation. Elle est utilisée notamment pour valider l'acceptation d'une technologie par la validation d'hypothèses [4]. Des travaux ont été réalisés sur le bouclage de cette méthode avec des entretiens semi-directifs pour améliorer l'approche [5-6]. Cette méthode peut inclure le niveau technologique de la personne [7-8]. Une corrélation peut également être faite avec la culture/nationalité de l'utilisateur [9]. Un questionnaire de personnalité bien connu, le Big Five, peut également être relié à ce type d'étude [10]. La méthode SART est un questionnaire avec une échelle de Likert en sept points et dix (ou trois) dimensions permettant de mesurer la conscience de la situation (perception des éléments et événements de l'environnement par rapport aux événements dans le temps ou dans l'espace), qui peut également être utilisé dans ce type d'étude [11].

De ces principales méthodes, nous en déduisons qu'il est complexe d'en tirer une acceptation si le profil de la personne n'a pas été évalué dans le détail. Dans les travaux de [2], même si l'analyse a été réalisée principalement en environnement universitaire, le niveau technologique comme le profil psychologique de la personne sont des éléments d'importance à étudier et à associer avec la méthode TAM pour évaluer cette acceptation. Cet article n'abordera pas l'utilisation de la méthode SART ou RULA afin de ne pas surcharger cognitivement le participant lors du remplissage du questionnaire.

### 3. METHODOLOGIE

#### 3.1. Organisation du questionnaire

Le questionnaire mis en œuvre est la concaténation des travaux précédemment cités. Le questionnaire de niveau technologique définit le niveau global de maîtrise des technologies courantes. L'utilisateur répond sur une échelle de Likert en sept points (n'en a jamais entendu parler, n'est pas sûr de ce que c'est, ne l'a jamais utilisé, l'a utilisé une fois dans sa vie, l'a utilisé une fois par an, plusieurs fois par an, une fois par semaine) sur sa maîtrise de l'outil proposé. Les outils proposés concernent une perceuse, une meuleuse, un tournevis, un smartphone...des composants ayant des fonctionnalités similaires à l'objet étudié.

Le questionnaire Big Five existe dans différentes versions avec divers degrés de détail. Nous avons choisi d'utiliser une version avec seulement 15 questions, trois par dimension comme dans [10], mais nous avons choisi d'étendre l'échelle à sept points afin d'harmoniser les échelles au regard de l'ensemble du questionnaire

(fortement en désaccord, en désaccord, plutôt en désaccord, ni en accord, ni en désaccord, plutôt d'accord, d'accord, tout à fait d'accord). Chaque sous-groupe de questions est calculé en moyenne pour obtenir un score pour chaque participant sur les cinq caractéristiques suivantes : ouverture d'esprit à l'expérience, conscienciosité, extraversion, agréabilité et névrotisme.

Le questionnaire TAM, quant à lui, évalue plusieurs facteurs à l'aide de questions simples posées à la suite de l'expérience. Les facteurs comprennent la performance de l'exosquelette qui décrit le sentiment d'amélioration des conditions de travail du participant. Aussi, l'utilité de l'exosquelette décrit sa pertinence pour la tâche effectuée. La sécurité décrit la confiance du participant et son sentiment de sécurité face au danger représenté. L'esthétique décrit la perception visuelle apportée par le dispositif. Le confort indique le sentiment ressenti par le participant. Enfin, la sensation de poids indique si le participant a été gêné par le poids de l'exosquelette. Finalement, la facilité d'utilisation indique si la prise en main et l'utilisation a été rapide à comprendre et à assimiler.

La troisième partie du questionnaire concerne les informations des participants, en effet ils doivent renseigner leur âge, genre et taille de leur main. Pour finir, ils doivent renseigner quel type d'exosquelette ils ont déjà utilisé. Ce questionnaire a fait l'objet d'un examen du comité d'éthique de la recherche non interventionnelle (CERNI) de Nantes Université et sa validation est enregistré sous le numéro de référence n°28062022.

#### 3.2. Organisation de l'expérience

La personne dirigeant l'expérience réalise un briefing sur l'expérience et précise quelles données sont collectées. Le participant remplit ensuite un formulaire de consentement éclairé. La personne dirigeant l'expérience se met alors à une table depuis laquelle il gère les enregistrements. Ensuite, elle présente l'exosquelette (capteurs, télécommande) puis des exercices à réaliser.





Figure 2 : Activité de vissage/dévisage à différentes hauteurs (a) ; Activité de transports de charge (b)

Les exercices à réaliser ont été définis avec les applications préconisées par Bioservo. Les applications de l'IronHand concernent l'utilisation d'outils à guidage manuel, l'entreposage, la manipulation de charges lourdes. Le premier exercice consiste, avec une perceuse, à visser 10 vis à différents niveaux sur une planche en bois puis de les dévisser. Cet exercice permet d'avoir une tâche répétitive avec un besoin de force de préhension pour maintenir la perceuse (Figure 2a). Le deuxième exercice consiste à déplacer 10 cartons d'une masse d'environ 10kg d'une table à une autre environ espacé de 2 mètres. Cet exercice permet d'avoir une tâche d'entreposage répétitive (Figure 2b).

Un QR code est mis à disposition pour leur donner accès au questionnaire (cela permet de ne pas leur demander leur adresse mail). Le participant a une première partie du questionnaire à remplir sur son niveau technologique. Ensuite, le participant réalise les exercices sans l'exosquelette.

La personne dirigeant l'expérience mesure la main du participant pour choisir correctement le gant en se référant au tableau de mesures préconisé par Bioservo. Le participant met en place l'exosquelette et prend en main l'IronHand avec la manipulation d'une gourde, le serrage de la main du participant précédent et la manipulation des niveaux de puissances sur la télécommande. Ensuite, le participant réalise les exercices avec l'exosquelette. Lorsque les exercices ont tous été réalisés, le participant enlève l'IronHand et poursuit le questionnaire.

En toute fin du questionnaire, il remplit son âge, sa taille, son genre et sa manualité. Quand l'étude est terminée, le participant peut librement discuter avec l'expérimentateur. L'expérience dure environ une vingtaine de minutes. Le temps de l'expérience dépend de la phase de familiarisation avec le gant.

#### 4. RESULTATS

Vingt et une personnes ont réalisé les manipulations avec l'IronHand sur les deux exercices proposés ainsi que sur le questionnaire fourni. Les données recueillies ont

permis de calculer les différents indicateurs. L'âge moyen des participants est de 24 ans, leur taille moyenne de 179 cm, 4.76 % des répondants étaient des femmes et 95.24% des hommes. Tous les participants étaient des étudiants. 14% d'entre eux avaient déjà utilisé un exosquelette auparavant.

Pour réaliser l'étude des réponses du questionnaire, les valeurs : « Fortement en désaccord », « En désaccord », « Plutôt en désaccord », « Ni d'accord ni en désaccord », « Plutôt d'accord », « D'accord », « Tout à fait d'accord », ont été modifiées par des valeurs numériques de 1 à 7. 1 est égale à « Fortement en désaccord » et 7 à « Tout à fait d'accord ».

#### 4.1. Validation des échelles de mesure

Pour valider les échelles de mesure utilisées, nous avons choisi d'effectuer une étude de l'alpha de Cronbach [12] sur l'ensemble du questionnaire. L'alpha de Cronbach est une mesure de fiabilité interne qui est couramment utilisée pour évaluer la cohérence d'un ensemble de questions ou d'items dans un questionnaire ou une échelle de mesure. En d'autres termes, il permet de savoir si les questions posées mesurent effectivement la même chose et si elles sont cohérentes entre elles. Un alpha de Cronbach élevé (généralement supérieur à 0,7) indique une forte cohérence entre les items et une fiabilité élevée de l'échelle de mesure. En revanche, un alpha de Cronbach faible (inférieur à 0,5) indique une faible cohérence entre les items et une fiabilité insuffisante de l'échelle de mesure. Nous avons considéré qu'une valeur supérieure à 0,6 est acceptable compte tenu du faible nombre d'échantillons mesurés [13]. Si cette valeur est trop faible, nous nous permettons de supprimer une question pour améliorer la cohérence interne de la dimension. Le questionnaire complet a un alpha de Cronbach d'environ 0,72, ce qui nous permet de montrer sa pertinence. De même, le questionnaire technologique a un score pertinent de 0,76. Enfin, la deuxième section du questionnaire offre des résultats plus contrastés sur ces dimensions, les questions étant issues de questionnaires moins répandus et éprouvés. Nous avons donc dû en supprimer certaines sur différentes dimensions pour obtenir des scores nous permettant de valider ces échelles de mesure.

Par conséquent, le critère « Confort » a été raccourci de deux questions. De plus, aucun résultat n'a été supprimé pour une mauvaise réponse à une question d'attention placée au hasard dans le questionnaire. L'ensemble des alphas de Cronbach se trouve dans le tableau 1

Tableau 1 - Alpha de Cronbach

	Cronbach
Tous	0,72
Niveau technologique	0,76
Sécurité	0,92
Confort	0,55

<b>Performance</b>	0,73
<b>Utilité</b>	0,74
<b>Esthétique</b>	0,65
<b>Suivi des intentions</b>	0,68

#### 4.2. Analyse directe

Les résultats du questionnaire sont présentés dans la figure 3. Le niveau technologique des participants est assez hétérogène avec une moyenne de 4.5 et une variabilité très étendue. Cela s'explique par le fait que la population d'âge a des parcours scolaires différents.

Les résultats du questionnaire de l'expérience montrent que les sujets se sentent en sécurité avec l'exosquelette (Moyenne de 5.3). De plus, les participants pensent que leurs performances sont améliorées (Moyenne de 4.5) et que l'exosquelette suit correctement leur intention lors des tâches (Moyenne de 5), cependant l'utilité de l'exosquelette est mitigée entre les participants mais l'IronHand semble utile (moyenne de 4.5) pour les deux exercices réalisés.

Ensuite, les sujets sont convaincus par l'esthétique de l'IronHand (Moyenne de 5.3) à condition de ne pas considérer la question portant sur la taille du sac à dos faisant chuter l'alpha de Cronbach (Alpha de Cronbach de 0.45). On notera qu'ils sont divisés pour le confort du gant et du sac à dos avec des avis entre 3 et 6.

Ces résultats montrent des éléments intéressants sur l'exosquelette. Nous pensions préalablement que l'expérience serait positive mais les résultats obtenus montrent que l'adaptation est à relativiser. On voit très clairement que le confort est un élément sur lequel il est important de travailler. L'utilité est éventuellement à revoir car sur une période d'utilisation de quelques heures, le score pourrait être revu à la hausse. Nous nous sommes interrogés sur le niveau technologique et avons supprimé 5 participants ayant un niveau technologique bas. Les résultats n'ont pas permis de cerner d'autres aspects.

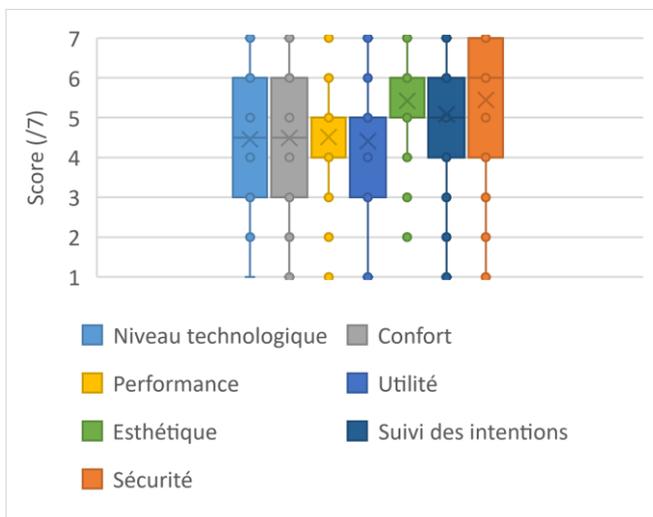


Figure 3 : Résultats obtenus

#### 4.3. Analyse du coefficient de corrélation

Nous avons donc choisi de procéder à une analyse en utilisant le coefficient de corrélation de Pearson entre chaque dimension du questionnaire. Cette analyse permet de savoir si les deux variables sont corrélées positivement (c'est-à-dire qu'elles augmentent ou diminuent ensemble), négativement (c'est-à-dire qu'elles varient en sens opposé) ou pas du tout corrélées. Le coefficient de Pearson varie entre -1 et 1. Un coefficient de 1 indique une corrélation positive parfaite, c'est-à-dire que les deux variables augmentent ou diminuent ensemble de manière parfaite. Un coefficient de -1 indique une corrélation négative parfaite, c'est-à-dire que les deux variables varient en sens opposé de manière parfaite. Un coefficient de 0 indique qu'il n'y a aucune corrélation entre les deux variables.

Celui-ci est présenté ci-dessous. Le but de cette analyse est de montrer que certaines dimensions du questionnaire sont corrélées entre elles, ce qui représente la même expérience utilisateur. On peut observer sur la figure 4, le corrélogramme des données. Il y a deux principales corrélations : Performance/Utilité et Utilité/Confort. Cette dernière représentation faisant le lien entre ces 3 grandeurs permet clairement de mettre en avant l'amélioration du produit à mettre en place : le confort !

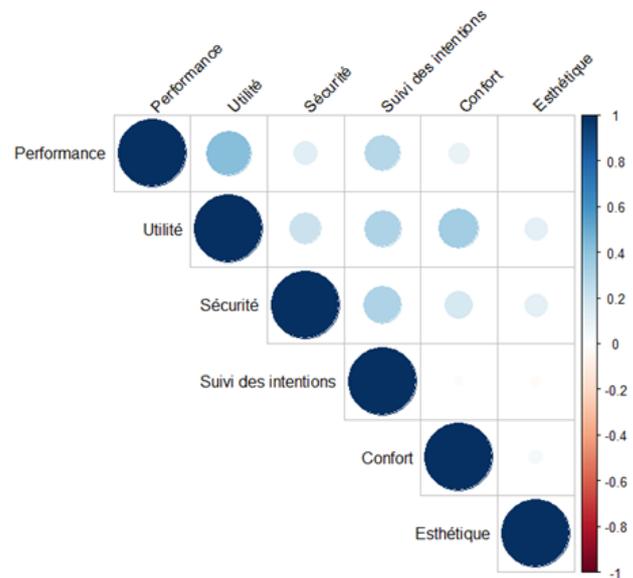


Figure 4 : Corrélogramme des données

#### 4.4. Conclusion de cette étude

Les résultats obtenus à travers la démarche méthodologique mise en avant par [2] ont permis de cerner le point faible de cet équipement pour améliorer son acceptation. Dès lors, il serait pertinent de mener des entretiens semi-directifs avec les participants pour comprendre les attributs sur lesquels travailler pour améliorer le confort et plus globalement l'expérience utilisateur de cet équipement qui est disponible à la location.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces travaux mettent en avant l'utilisation d'une démarche méthodologique pour étudier les éléments menant à une acceptation d'un dispositif à partir de questionnaires. Les principaux résultats concernent le manque de confort du dispositif et l'importance de mener une analyse plus poussée de l'expérience utilisateur du produit.

Ces travaux ont permis également de réfléchir à un préhenseur multi-pièce basé sur le gant IronHand. L'acquisition d'une main en silicone fixée en bout de robot a permis de faire des essais de préhension d'objets (Figure 5). La difficulté de positionnement de la main au regard de l'objet nous pousse à développer des algorithmes d'estimation de poses de main à partir de la bibliothèque OpenCV [14]. Ces travaux s'inscrivent dans un ensemble de recherche traitant de l'apprentissage par imitation (Figure 6) et plus globalement du projet ANR AIBY4 visant deux axes applicatifs – Industrie du futur et Santé du futur – et deux axes plus théoriques – IA par les humains et IA pour les humains.



Figure 5 : test de préhension d'objets : balle, tissus



Figure 6 : Installation de la main sur un robot collaboratif

## RÉFÉRENCES

- [1] Gull, M. A., Bai, S., & Bak, T. (2020). A review on design of upper limb exoskeletons. *Robotics*, 9(1), 16.
- [2] Muller, T., Subrin, K., Joncheray, D., Billon, A., & Garnier, S. (2022). Transparency Analysis of a Passive Heavy Load Comanipulation Arm. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*.
- [3] Sim, D. Y. Y., & Loo, C. K. (2015). Extensive assessment and evaluation methodologies on assistive social robots for modelling human-robot interaction—A review. *Information Sciences*, 301, 305-344.
- [4] Penner, D., Abrams, A. M. H., Overath, P., Vogt, J., & Beckerle, P. (2019). Robotic leg illusion: System design and human-in-the-loop evaluation. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 49(4), 372-380.
- [5] Moyon, A., Poirson, E., & Petiot, J.-F. (2019). Development of an acceptance model for occupational exoskeletons and application for a passive upper limb device. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 291-301.
- [6] Subrin, K., Muller, T., Gonzalez Ojeda, I. d. J., Garnier, S., Meriau, B., & Furet, B. (2019). Cobotization of polishing operations for large composite parts. In *16th National Smart Conference* (pp. 1-6).
- [7] Henderson, M. M. (2015). Industrial robot acceptance: Effects of workforce demographics and establishing a culture of acceptance within manufacturing industry (Doctoral dissertation, Department of Engineering Management, University of South Carolina).
- [8] Hsieh, Y.-H., Huang, Y.-C., Young, K.-Y., Ko, C.-H., & Agrawal, S. K. (2016). Motion guidance for a passive robot walking helper via user's applied hand forces. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(6), 869-881.
- [9] Chien, S.-Y., Lewis, M., Sycara, K., Kumru, A., & Liu, J.-S. (2020). Influence of culture, transparency, trust, and degree of automation on automation use. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 50(3), 205-214.
- [10] Hu, Y., Benallegue, M., Venture, G., & Yoshida, E. (2020). Interact with me: An exploratory study on interaction factors for active physical human-robot interaction. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 6764-6771.
- [11] Roth, G., Schulte, A., Schmitt, F., & Brand, Y. (2020). Transparency for a workload-adaptive cognitive agent in a manned-unmanned teaming application. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 50(3), 225-233.
- [12] Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297-334.
- [13] Bujang, M. A., Omar, E. D., & Baharum, N. A. (2018). A review on sample size determination for Cronbach's alpha test: A simple guide for researchers. *Malaysian Journal of Medical Sciences*, 25(6), 85-99.
- [14] Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C. L., & Grundmann, M. (2020). Mediapipe hands: On-device real-time hand tracking. *arXiv preprint arXiv:2006.10214*.



# Technologies de l'industrie 4.0 applicables à la chasse aux gaspillages du lean manufacturing

D. Tadjia <sup>a,\*</sup>, V. Nadeau <sup>b</sup>, A. Mercier <sup>c</sup>, T. Wong <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Polytechnique Montréal, 2500 Chemin de Polytechnique, Montréal (Québec), H3T 1J4

<sup>b, c, d</sup> École de technologie supérieure, 1100 Rue Notre-Dame Ouest, Montréal (Québec), H3C 1K3

\* e-mail : diderot-deraillet.tadjia@polymtl.ca

## 1. INTRODUCTION

L'importance de la productivité, de la qualité et de la performance pour les entreprises manufacturières est bien connue dans la littérature [1]–[5] et dans la pratique, une entreprise qui n'affiche pas de bons résultats sur le plan de la productivité est condamnée à court, moyen ou long terme à la faillite. Le niveau de productivité d'une entreprise est le reflet de son état de santé. Celle-ci résulte de l'élimination des opérations sans valeur ajoutée soit, les sept types de gaspillage.

Le lean manufacturing ou production amincie est reconnu et largement accepté pour son efficacité dans l'élimination des gaspillages et donc l'amélioration de la productivité des entreprises [6]–[8]. Mais, bien que le lean manufacturing ait prouvé son efficacité pour la bonne conduite des opérations, sa mise en œuvre reste encore un défi pour plusieurs entreprises [9].

Tout comme le lean manufacturing, les technologies de l'industrie 4.0 sont présentées comme des facteurs clés pour améliorer la productivité, promouvoir la croissance économique et garantir la durabilité des entreprises manufacturières [10]. Ce que l'industrie 4.0 apporte concrètement aux systèmes de production se résume à l'accroissement des capacités de surveillance, de contrôle, d'optimisation et d'autonomie [11]. Par ailleurs l'industrie 4.0 connaît un engouement dans les milieux académiques et professionnels. Aujourd'hui, plus de 8 billions d'objets industriels sont connectés dans le monde et ils seront de 13.7 billions en 2025 [12]. Donc le passage à l'industrie 4.0 pour les entreprises manufacturières semble inévitable.

Le lean manufacturing et l'industrie 4.0 ont presque le même objectif soit améliorer sinon optimiser les performances opérationnelles des systèmes de production. En guise de tandem entre les deux approches, de récents travaux [13]–[15] ont renseigné que les pratiques techniques du lean manufacturing peuvent être

numérisées à l'aide des technologies de l'industrie 4.0 pour donner naissance au Kanaban 4.0, VSM 4.0, Just-in-time 4.0, etc. Cependant, en ce qui concerne la chasse aux gaspillages qui est l'épine dorsale du lean manufacturing, très peu d'écrits au meilleur de nos connaissances, présentent pratiquement l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0 pour mener la chasse aux gaspillages. Certains auteurs [16]–[18] se limitent simplement à présenter les technologies de l'industrie 4.0 comme possibles moyens de chasse aux gaspillages sans exposer un cas concret.

Le travail exposé dans cet article est une preuve de concept qui vise à montrer qu'il est possible de mener la chasse aux gaspillages avec une solution pratique et simple basée sur les technologies de l'industrie 4.0.

Ce travail commence par les concepts généraux sur la chasse aux gaspillages du lean manufacturing et l'industrie 4.0 à la section 2. Ensuite, une synthèse des technologies de l'industrie 4.0 applicables à la chasse aux gaspillages est présentée à la section 3. Puis, un exemple de développement de solution utile à la chasse aux gaspillages de type temps d'attente est présenté à la section 4. L'article se termine par une discussion à la section 5 une conclusion à la section 6.

## 2. CONCEPTS GÉNÉRAUX

L'objectif de cette section est de présenter de façon sommaire les deux principaux concepts qui sont au centre de l'objet de ce travail à savoir les technologies de l'industrie 4.0 et les 7 gaspillages du lean manufacturing.

### 2.1. Principales technologies de l'industrie 4.0

Tout d'abord, il convient de rappeler que l'industrie 4.0 a été annoncée pour la première fois en 2011 à la foire industrielle de Hanovre en Allemagne pour marquer l'avènement de la 4<sup>ème</sup> révolution industrielle [19]. Mais

bien avant, en 1999, l'Internet des Objets avait déjà vu le jour avec les travaux sur la Radio Frequency Identification (RFID) au laboratoire Auto-ID du Massachusetts Institute of Technology (MIT) [20]. Ainsi, l'Internet des Objets peut être considéré comme précurseur de l'Industrie 4.0.

L'association allemande de télécommunication BITKOM révèle qu'il existe au moins 104 définitions différentes de l'industrie 4.0 [21]. De notre point de vue, on peut simplement percevoir l'industrie 4.0 comme un regroupement de plusieurs technologies numériques qui visent à améliorer sinon optimiser la conception, la fabrication et la distribution des produits manufacturiers.

Les technologies de l'industrie 4.0 ont en commun la donnée numérique. Comme dans l'industrie les informations et donc les données sont omniprésentes, l'industrie 4.0 trouve ainsi un très grand champ d'application. Chaque technologie a un domaine d'application bien spécifique cependant, il n'est pas exclu de les combiner pour résoudre des cas particuliers. Au regard du nombre de technologies numériques mentionnées dans la littérature, il peut être assez confus de dire quelle technologie appartient au groupe de l'industrie 4.0. Ainsi, le tableau 1 qui suit est une synthèse de quelques publications entre 2015 et 2020 qui résume l'essentiel des technologies de l'industrie 4.0 [22].

**Tableau 1 - Synthèse des groupes technologiques de l'industrie 4.0**  
Tiré de [22]

	I o T	C P S	C C	B D	C S	M A	R A	S S	M 2 M	I A	I H V	F A
Dombrowski (2017)	1	1		1		1			1			
CEFRIO (2016)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Gerbert (2015)	1		1	1	1	1	1	1			1	1
Shahin (2020)	1	1		1				1	1			
Pagliosa (2019)	1	1	1	1		1	1	1			1	1
Mayr (2018)			1	1		1	1	1		1		1
Wagner (2017)		1	1	1			1		1		1	
Rossini (2019)	1		1	1		1	1			1		1
Kamble (2020)	1		1	1		1	1					1

1= Le groupe technologique fait partie de l'industrie 4.0 selon l'auteur

Cette synthèse permet de constater que l'internet des objets (IoT), les systèmes cyber physiques (CPS), le cloud (CC), le big data (BD), les machines autonomes ou robots (MA), la réalité augmentée (RA), les systèmes de simulation (SS) et la fabrication additive (FA) sont les 8 principales technologies de l'industrie 4.0. En effet, la fréquence empirique de chacune d'elle est de plus de 50%.

Les autres groupes technologiques soit la cyber sécurité (CS), la communication machine to machine (M2M), l'intelligence artificielle (IA) puis l'intégration horizontale et verticale (IHV) trouvent indiscutablement des applications dans l'industrie ; ils ne sont simplement pas encore assez représentatifs pour être pris en compte lorsqu'on évoque les technologies de l'industrie 4.0.

## 2.2. Les 7 gaspillages du lean manufacturing

Le lean manufacturing est l'expression anglaise utilisée pour désigner la production amincie. En anglais, « lean » signifie maigre. Dans les entreprises « maigres », « dégraissées » et économiques, le « gras » renvoie aux opérations qui n'apportent pas de valeur ajoutée du point de vue du client [23]. L'origine du « gras » dans un système de production de biens est le gaspillage. Un gaspillage est tout sauf la quantité minimale d'équipements, matériaux, composants et temps de travail qui sont absolument essentiels à la production [6]. Traditionnellement, il existe 7 gaspillages qui peuvent se manifester pendant l'opération d'un système de production. Ceux-ci ont été identifiés et définis par [24]-[26].

Une synthèse de leurs définitions permet de présenter très pratiquement chacun des 7 gaspillages comme suit :

- Surproduction : Produire plus que ce qui est demandé ou avant que les clients n'en demandent.
- Temps d'attente : temps passé à ne rien faire dans l'attente de l'exécution d'une opération, d'un outil de travail, etc.
- Transport inutile : déplacement inutile des composants ou des matériaux pendant les opérations.
- Surtraitement : opérations de traitement supplémentaire, opérations qui permettent de fabriquer des produits de qualité supérieure que ce qui est demandé.
- Mouvement inutile : mouvent des personnes dans l'environnement de production sans contribution à la production.
- Défauts : fabrication des produits non conformes aux exigences du client.
- Surstockage : excès de matière première, produit fini ou produit en cours sur une période donnée.

À la vue de ces définitions, on peut raisonnablement penser que pour qu'une entreprise fonctionne à un rendement optimal, elle doit être complètement débarrassée de ces gaspillages. Le lean manufacturing est un système intégré de principes, pratiques, d'outils et de techniques qui peuvent être utilisés à cette fin [27].

## 3. TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0 ET CHASSE AUX GASPILLAGES

Dans cette section, il est présenté les technologies de l'industrie 4.0 potentiellement utiles à la chasse aux gaspillages. Il est aussi présenté sommairement la façon dont certaines d'entre elles agissent sur chaque type de gaspillage.

### 3.1. Quelle(s) technologie(s) de l'industrie 4.0 pour chasser quel(s) gaspillage(s) ?

La chasse efficace aux gaspillages requiert les outils appropriés. Les technologies de l'industrie 4.0 sont à divers degrés applicables à cette fin. [16], [18], [28] ont effectué des travaux qui permettent comme le montre le tableau 2, d'établir une relation entre chaque type de gaspillage et les technologies qui peuvent être utilisées pour les identifier, les éliminer ou les éviter.

Tableau 2 - Relation entre les gaspillages et les solutions technologiques

	I o T	C P S	C C	B D	C S	M A	R A	S S	M 2 M	I A	I H V	F A
Surproduction	1	1		1								1
Temps d'attente	1	1	1	1								
Transport inutile	1			1		1					1	1
Surtraitements				1			1			1		1
Mouvement inutile				1		1		1				1
Défauts	1		1			1						
Surstockage	1		1					1				1

1= Le groupe technologique est applicable à la chasse du gaspillage correspondant selon les auteurs.

On peut remarquer à partir de ce tableau que l'IoT, le BD et la FA sont les principales technologies citées comme étant utiles à la chasse des gaspillages.

### 3.2. Modes d'action des technologies

Dans cette section, il est présenté succinctement l'utilisation possible des technologies de l'industrie 4.0 pour mener la chasse à chaque type de gaspillages.

- **Surproduction :** La surproduction peut être détectée et éliminée par une gestion efficace des flux de production. Dans cette optique, l'action de l'IoT est de collecter les données en temps réel sur les quantités produites et les CPS contribuent à une prise de décision rapide sur la planification de la production [18].
- **Temps d'attente :** L'intégration verticale et horizontale peut jouer un rôle clé dans la réduction des temps d'attentes en permettant aux différentes parties prenantes de recevoir un retour rapide d'information en situation de prise de décision [17]. Aussi, la connectivité des machines par le biais de l'IoT peut aboutir à une maintenance prédictive ce qui augmente la fiabilité des machines et donc diminue les temps d'arrêts qui sont en réalité des temps d'attente. Quant au BD, il a été montré par [29] que l'utilisation du BD peut diminuer les temps d'attente dans un procédé manufacturier.
- **Transport inutile :** Les applications du BD ont des retombées positives dans le domaine du transport en milieu manufacturier [30]. En effet, ces applications pourraient améliorer

l'identification et le diagnostic de l'itinéraire des véhicules, équipement et personnel [31], [32]. Ainsi, des itinéraires optimaux pourraient être définis pour les opérations récurrentes.

- **Surtraitements :** La visualisation des processus de production grâce aux des technologies de l'industrie 4.0 permet de cerner et éliminer les étapes inutiles effectuées pendant la production [33]. À cette fin, la connectivité offerte par l'IoT peut servir à relayer les informations et les instructions de travail pour éviter les erreurs dans le processus de production [31].
- **Mouvement inutile :** Les logiciels de simulation ont la capacité de réduire les mouvements inutiles [34] car les postes de travail et l'environnement manufacturier peuvent être conçus à partir des simulations. En conséquence, les mouvements inutiles seront diminués pendant les opérations.
- **Défauts :** L'utilisation de L'IoT a un impact avéré et clair sur l'identification des produits et composants défectueux aux différentes étapes de la production [35]. Cela permet de résoudre plus efficacement les problèmes de non-qualité.
- **Surstockage :** Une meilleure communication et connectivité dans la chaîne de valeur par le biais des technologies de l'industrie 4.0 permet d'obtenir les informations en temps réel sur les capacités des fournisseurs et la demande des clients permettant ainsi un meilleur contrôle des stocks [31]. Le CC en particulier garanti une meilleure prévision des demandes et des stocks par rapport aux logiciels classiques [17], [18].

## 4. EXEMPLE DE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME D'IDENTIFICATION DE GASPILLAGE

Dans cette section, il est présenté un exemple de système de détection de gaspillage de type temps d'attente pouvant se manifester pendant l'opération d'un système de production.

### 4.1. Présentation sommaire du système

La fonction du système est de détecter la présence d'un objet physique et de déterminer l'intervalle de temps entre la détection de présence de deux objets successifs. Le système est composé d'une carte Raspberry Pi modèle 3b et d'une caméra Pi 5MP 1080P. Son architecture permet de dire qu'il s'agit d'un système IoT à deux couches. En effet, la caméra est la première couche et la carte Raspberry Pi étant la deuxième couche. La figure 1 ci-dessous montre un aperçu du système assemblé.



Figure 1 - Aperçu du prototype du système intégré

Pour reconnaître la présence d'objets, le système effectue la détection du niveau de gris des captures d'images avec seuillage paramétrable. Ensuite, il vérifie que les images modifiées des objets ont quatre contours et enfin que l'aire de chacune d'elles est comprise entre une valeur minimale et une valeur maximale. Quant à l'évaluation de l'intervalle de temps entre deux images d'objets, le système garde en mémoire les différents moments de capture d'image et traite ensuite cette information. L'intervalle de temps entre la présence de deux objets détectés correspond au temps d'attente qui s'est écoulé entre leurs passages devant la caméra.

Enfin, les informations sur la détection de présence d'objet et du temps d'attente sont inscrites dans un fichier CSV par le système.

#### 4.2. Tests de fonctionnement du système

Les tests effectués visent à valider l'aptitude du système à détecter la présence d'un objet physique et à évaluer l'intervalle de temps entre deux objets qui se suivent. L'objet utilisé est un « lego », soit une pièce de forme rectangulaire.

Pour valider la présence d'un objet, une centaine de captures d'image ont été effectuées avec et sans présence d'un objet. La réponse du système a été enregistrée pour chaque capture d'image. Pour tester le réalisme de la mesure de temps du système, deux tests ont été effectués. Le premier a consisté à laisser l'objet immobile face à la caméra pendant 10 secondes, l'enlever pendant 30 secondes et le remettre pendant 10 secondes. Le deuxième test s'est effectué en suivant les mêmes étapes cependant avec l'objet en mouvement.

#### 4.3. Résultats

La figure 2 montre les résultats des tests de détection de présence d'objet en éclairage normal soit l'éclairage du jour dans une pièce à aire ouverte.

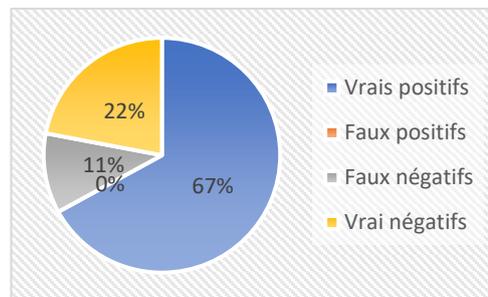


Figure 2 - Résultats du test de détection de présence d'un objet en éclairage normal

$$\text{Exactitude} = (TP+TN) / N = (67 + 22) / 100 = 89\%$$

$$\text{Précision} = TP / (TP+FP) = 67 / (67 + 0) = 100\%$$

Avec :

- TP : nombre de vrais positifs
- FP : nombre de faux positifs
- FN : nombre de faux négatif
- TN : nombre de vrai négatif
- N : nombre total de captures d'image

Le tableau 3 montre une comparaison entre les temps d'attente mesurés par le système et par un appareil de mesure indépendant.

Tableau 3 - Résultats des tests de mesure de temps d'attente

	Temps d'attente réel (S)	Temps d'attente mesuré (S)
Objet immobile	30	32.13
Objet en mouvement	30	33.59

## 5. DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Les résultats des tests de fonctionnement du système indiquent qu'il est capable de renseigner la présence ou l'absence d'un objet presque 9 fois sur 10 avec une précision parfaite. Cependant, nous remarquons que l'information sur le temps d'attente a une erreur absolue de 2.13 secondes lorsque l'objet est immobile et de 3.59 secondes lorsqu'il est en mouvement. Nous pensons que les écarts des résultats de mesures du temps d'attente sont imputables à la qualité de la caméra utilisée. Celle-ci prend 1 à 2 secondes pour effectuer les captures d'image. C'est pourquoi nous recommandons de changer de caméra pour l'amélioration de ce résultat. Quant à l'exactitude qui est imparfaite, nous pensons que la position de la caméra par rapport à l'objet et l'intensité de la lumière du jour auraient eu un impact sur ce résultat. Ainsi, nous recommandons d'effectuer les tests dans un environnement lumineux mieux contrôlé et de fixer adéquatement la caméra par rapport à la façade de l'objet à filmer. Cela pourrait donner un meilleur résultat de l'exactitude.

Le système en l'état actuel ne peut qu'effectuer la détection et la reconnaissance des objets de forme rectangulaire. Nous recommandons d'implémenter une nouvelle stratégie soit l'apprentissage supervisé dans le système ce qui améliorerait la qualité de la détection et de la mesure du temps d'attente. En plus, avec l'apprentissage supervisé le système serait capable de reconnaître les objets de diverses formes.

En lieu et place du système présenté dans cet article pour la détection des temps d'attente, des systèmes beaucoup plus simples auraient pu être utilisés pour mesurer l'intervalle de temps entre deux objets consécutifs. À la différence des autres types de capteurs tels que les détecteurs de proximité, les cellules photoélectriques, etc., la caméra offre la possibilité de reconnaître la forme de l'objet en plus de renseigner sur sa présence. Donc le développement du système avec caméra a une extension possible vers des applications de contrôle de la qualité.

Pour que l'intervalle de temps mesuré par le système soit qualifié de gaspillage, il faut spécifier une limite de temps au-delà duquel il s'agit d'un gaspillage au sens du lean manufacturing. Dans un système de production réel, nous recommandons d'abord de bien déterminer l'emplacement de la caméra. Idéalement celui-ci doit être placé à la sortie des produits finis ou des en-cours de production. En plus il faut déterminer les seuils de qualification des temps d'attente à chaque emplacement des caméras pour une utilisation efficace du système.

## 6. CONCLUSION

Le but visé dans ce travail était de montrer qu'il est pratiquement possible de mener la chasse aux gaspillages du lean manufacturing au moyen des technologies de l'industrie 4.0. Pour cela, nous avons effectué un rappel de la définition des différents types de gaspillage, identifier les technologies de l'industrie 4.0 utiles à la chasse aux gaspillages puis développer et tester une preuve de concept applicable à la détection des temps d'attente. Ce travail permet aussi de montrer qu'il est possible de réconcilier le lean manufacturing et l'industrie 4.0 qui ont tous deux le même objectif. Pour les entreprises qui ont déjà implémenté le lean manufacturing, une approche en utilisant les systèmes semblables à celui qui a été présenté dans cet article peut les permettre d'effectuer un passage à l'industrie 4.0.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions grandement le professeur Michel Tollenanere qui a jugé bon et utile de nous informer de la tenue de ce colloque et surtout pour nous avoir invités à y participer. Merci beaucoup Michel.

Nous remercions également Grenoble INP - Génie industriel pour avoir accepté de prendre en charge les frais associés à notre participation.

## RÉFÉRENCES

- [1] R. Mohanty, « Understanding the integrated linkage: Quality and productivity », *Total Quality Management & Business Excellence - TOTAL QUAL MANAG BUS EXCELL*, vol. 9, p. 753-765, déc. 1998, doi: 10.1080/0954412988226.
- [2] A. M. Belay, P. Helo, J. Takala, et F. Kasie, « Effects of quality management practices and concurrent engineering in business performance », *International Journal of Business and Management*, vol. 6, n° 3, p. 45-62, 2011, doi: 10.5539/ijbm.v6n3p45.
- [3] A. Alsughayir, « The impact of quality practices on productivity and profitability in the Saudi Arabian dried date industry », *American Journal of Business and Management*, vol. 2, p. 340-346, 2013, doi: 10.11634/216796061302465.
- [4] B. Crouzet, D. Parker, et R. Pathak, « Preparing for productivity intervention initiatives », *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 63, n° 7, p. 946-954, sept. 2014, doi: 10.1108/IJPPM-10-2013-0175.
- [5] A. Prakash, S. K. Jha, K. D. Prasad, et A. K. Singh, « Productivity, quality and business performance: an empirical study », *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 66, n° 1, p. 78-91, janv. 2017, doi: 10.1108/IJPPM-03-2015-0041.
- [6] S. Taj et C. Morosan, « The impact of lean operations on the Chinese manufacturing performance », *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 22, n° 2, p. 223-240, 2011, doi: 10.1108/17410381111102234.
- [7] M. Dora, M. Kumar, D. V. Goubergen, A. Molnar, et X. Gellynck, « Operational performance and critical success factors of lean manufacturing in European food processing SMEs », *Trends in Food Science & Technology*, vol. 31, p. 156-164, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2013.03.002>.
- [8] J. A. Garza-Reyes, V. Kumar, S. Chaikittisilp, et K. H. Tan, « The effect of lean methods and tools on the environmental performance of manufacturing organisations », *International Journal of Production Economics*, vol. 200, p. 170-180, juin 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.03.030.
- [9] A. Pearce, D. Pons, et T. Neitzert, « Implementing lean - Outcomes from SME case studies », *Operations Research Perspectives*, vol. 5, p. 94-104, 2018, doi: 10.1016/j.orp.2018.02.002.
- [10] F. Rosin, P. Forget, S. Lamouri, et R. Pellerin, « Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles », *International Journal of Production Research*, vol. 58, n° 6, p. 1644-1661, mars 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1672902.
- [11] CEFRIO, « Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME ». CEFRIO, 2016.
- [12] Statista Research Department, « Internet des objets : nombre d'appareils connectés dans le monde 2015-2025 », *Statistica*, 2016. <https://fr.statista.com/statistiques/584481/internet-des-objets-nombre-d-appareils-connectes-dans-le-monde--2020/>
- [13] M. Rossini, F. Costa, G. L. Tortorella, et A. Portioli-Staudacher, « The interrelation between Industry 4.0 and lean production: an empirical study on European manufacturers », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, n° 9, p. 3963-3976, juin 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03441-7.
- [14] S. Kamble, A. Gunasekaran, et N. C. Dhone, « Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies », *International Journal of Production Research*, vol. 58, n° 5, p. 1319-1337, mars 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1630772.
- [15] G. L. Tortorella et D. Fettermann, « Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies », *International Journal of Production Research*, vol. 56, n° 8, p. 2975-2987, avr. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1391420.
- [16] F. D. Cifone, K. Hoberg, M. Holweg, et A. P. Staudacher, « 'Lean 4.0': How can digital technologies support lean practices? », *International Journal of Production Economics*, vol. 241, p. 108258, nov. 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2021.108258.
- [17] Yeen Gavin Lai, K. Hoong Wong, D. Halim, J. Lu, et H. Siang Kang, « Industry 4.0 enhanced lean manufacturing », in *2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, mars 2019, p. 206-211. doi: 10.1109/ICITM.2019.8710669.

- [18] S. Rajab, M. Afy-Shararah, et K. Salonitis, « Using Industry 4.0 capabilities for identifying and eliminating lean wastes », *Procedia CIRP*, vol. 107, p. 21-27, mai 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.04.004.
- [19] R. Drath et A. Horch, « Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum] », *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 8, p. 56-58, juin 2014, doi: 10.1109/MIE.2014.2312079.
- [20] Massachusetts Institute of Technology, « MIT auto-ID laboratory », 2020. <https://autoid.mit.edu/>
- [21] T. Bidet-Mayer, *L'industrie du futur: une compétition mondiale*. Paris: Presses des Mines, 2016.
- [22] D. Tadjia, S. Bassetto, T. Wong, et M. Tollenaere, « Les objets connectés pour améliorer la culture de la production épurée : revue de littérature et esquisse de solution applicable aux entreprises manufacturières », vol. 21-24, n° 1, p. 1-35, 2021, doi: 10.21494/ISTE.OP.2021.0745.
- [23] E. L. Zajkowska, « Contribution à l'implantation de la méthode Lean Six Sigma dans les Petites et Moyennes Entreprises pour l'amélioration des processus », École centrale de Lille, 2013. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00795533/document>
- [24] T. Ohno, *Toyota Production System: Beyond large-scale production*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 1988.
- [25] S. Shingo, *A study of the Toyota Production System from an industrial engineering Viewpoint*. Portland: Productivity Press, 1989.
- [26] J. Liker, *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. New york: McGraw-Hill Education, 2004.
- [27] R. Čiarnienė et M. Vienažindienė, « An empirical study of lean concept manifestation », *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 207, p. 225-233, oct. 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.10.091.
- [28] D. Singh, J. Bhamu, J. Bhadu, et P. Kumar, « Integration between Lean, Six Sigma and Industry 4.0 technologies », *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, vol. 13, juin 2021, doi: 10.1504/IJSSCA.2021.120224.
- [29] D. Kho, S. Lee, et R. Zhong, « Big Data Analytics for Processing Time Analysis in an IoT-enabled manufacturing Shop Floor », *Procedia Manufacturing*, vol. 26, p. 1411-1420, janv. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.107.
- [30] T. C. Edwin Cheng, S. S. Kamble, A. Belhadi, N. O. Ndubisi, K. Lai, et M. G. Kharat, « Linkages between big data analytics, circular economy, sustainable supply chain flexibility, and sustainable performance in manufacturing firms », *International Journal of Production Research*, vol. 60, n° 22, p. 6908-6922, nov. 2022, doi: 10.1080/00207543.2021.1906971.
- [31] J. Posada *et al.*, « Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 35, p. 26-40, mars 2015, doi: 10.1109/MCG.2015.45.
- [32] S. Wang, J. Wan, D. Li, et C. Zhang, « Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook », *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2016, p. 1-10, janv. 2016, doi: 10.1155/2016/3159805.
- [33] F. Shrouf, J. Ordieres-Meré, et G. Miragliotta, « Smart factories in industry 4.0: a review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of things paradigm. », p. 697-701, déc. 2014.
- [34] T. Coors *et al.*, « Simulation assisted process chain design for the manufacturing of bulk hybrid shafts with tailored properties », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, juin 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05532-2.
- [35] L. S. Valamede et A. C. Santos Akkari, « Lean Manufacturing and Industry 4.0: A Holistic Integration Perspective in the Industrial Context », in *2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, févr. 2020, p. 63-68. doi: 10.1109/ICITM48982.2020.9080393.

# Etude comparative des méthodes de création des modèles de transformation

Q. Brilhault <sup>a,\*</sup>, E. Yahia <sup>a</sup>, L. Roucoules <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Arts et Métiers Institut de Technologie, HESAM Université, LISPEN, 13617 Aix-en-Provence, France

\* e-mail : quentin.brilhault@ensam.eu

## 1. INTRODUCTION

La prédisposition des systèmes à communiquer, échanger de l'information puis utiliser les informations échangées fait appel à la notion d'interopérabilité des systèmes [1]. La nécessité d'instaurer un climat d'interopérabilité dans les entreprises n'est plus à démontrer. La coopération entre les systèmes (machine, robot, objets connectés, système d'information...) à travers le partage et l'échange d'informations permet de résoudre des activités complexes qu'un système seul ne pourrait résoudre individuellement.

Néanmoins, l'état actuel de l'environnement numérique industriel prouve qu'il est délicat de répondre aux exigences d'hyperconnectivité des technologies de l'Industrie du Futur. Les systèmes sont pour la plupart isolés, incompatibles et de plus en plus complexes. Leur conception emploie différents langages de programmation, divers protocoles de communication et un certain nombre de formats de données d'échanges qui inhibent l'interopérabilité des systèmes au niveau technique. Au niveau sémantique, l'opération de mappage qui vise à établir des relations d'équivalence entre les différentes représentations conceptuelles d'une même donnée est une activité délicate. L'hétérogénéité des systèmes impose impérativement le développement d'adaptateurs *ad-hoc* propres à chaque type de communications pour gommer les différences des systèmes. Or, dans un environnement numérique instable et dynamique bercé par l'émergence de nouvelles technologies, par la prolifération des nouvelles sources d'information et par la nécessité d'accroître la flexibilité et l'évolutivité de la chaîne de valeur, ces adaptateurs statiques semblent peu performants.

L'un des principaux défis pour l'interopérabilité du futur consiste à développer des connecteurs durables capables d'absorber de futurs changements ou recommandations pour s'adapter aux spécifications des

systèmes à interconnecter [2], et ce, en minimisant l'intervention humaine.

Les techniques de transformations de modèles pourraient fournir une solution concrète pour répondre aux exigences d'une interopérabilité durable. Les techniques de transformation de modèles constituent la pierre angulaire de l'Architecture Dirigée par les Modèles [3] (*Model-Driven Architecture MDA*). L'architecture MDA définit comment un modèle, conforme à son métamodèle, peut être transformé en un modèle conforme à un tout autre métamodèle [4] (voir Figure 1).

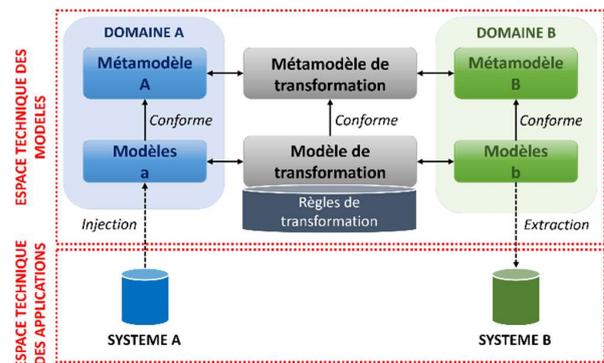


Figure 1 - Architecture Dirigée par les Modèles

Les techniques de transformation de modèle facilitent l'interopérabilité entre les modèles [5], et, *in fine*, elles permettent l'interopérabilité des systèmes. De nombreuses approches développées ces dernières années ont pour objectif de réduire les efforts à mettre en œuvre pour construire de manière automatique ou semi-automatique ces modèles de transformation. Cependant, les approches d'interopérabilité basées sur les modèles de transformation manquent d'un réel cadre expérimental propice à l'évaluation et à la comparaison des nouvelles approches vis-à-vis de la littérature existante. Les approches ne sont pas toujours validées par les mêmes indicateurs de performances et ne sont pas

souvent appliquées aux mêmes jeux de données. Compte tenu de l'hétérogénéité des métamodèles, il n'est pas toujours aisé de comparer les approches entre-elles puisqu'un modèle de transformation peut faire intervenir une multitude de patterns de transformation.

Suivant la méthode présentée en section 2, un protocole expérimental, permettant la comparaison des différentes approches d'interopérabilité des systèmes basées sur les modèles de transformation, sera proposé en section 3. La section 4 présentera quant à elle une étude comparative des différentes approches existantes répertoriées dans la littérature. La section 5 sera consacrée à la discussion des résultats obtenus par l'étude précédente.

## 2. METHODE

Dans le cadre d'une étude comparative, ou « *benchmark* », la construction d'un protocole expérimental est une activité rigoureuse qui nécessite de définir un certain nombre de paramètres. La Figure 2 présente l'agencement de ces paramètres les uns par rapport aux autres sous forme de métamodèle et peut être retrouvé via le *GitHub* <https://github.com/GIS-S-mart>.

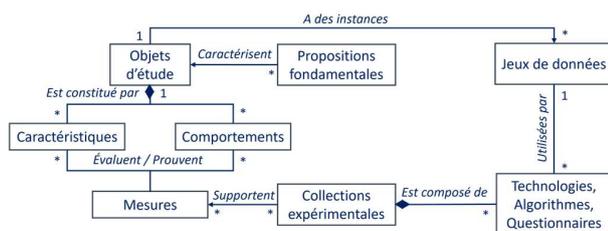


Figure 2 – Métamodélisation de la structure d'une étude comparative type « *benchmark* »

**Proposition fondamentale.** Cette étude repose sur l'hypothèse que les récentes avancées dans les domaines de l'apprentissage machine et de l'apprentissage profond simplifient et optimisent la création de modèles de transformation.

**Objet d'étude.** L'objet d'étude portera sur les méthodes permettant l'écriture des modèles de transformation.

**Caractéristiques.** Ces modèles de transformation sont définis par un ensemble de règles qui permettent la transformation d'un pattern source en un pattern cible. Ainsi les caractéristiques de l'objet d'étude correspondent aux différents patterns de transformation qui peuvent intervenir lors d'une transformation de modèle.

**Mesures.** Des indicateurs de performance ont été définis pour évaluer la capacité des différentes approches à inférer le modèle de transformation attendu.

**Collections expérimentales.** Une collection expérimentale recense l'ensemble des approches, ou outils (algorithmes, technologies...) consacrés à l'objet d'étude.

**Jeux de données.** Chacune des approches de la collection expérimentale sera appliquée à des jeux de données spécifiques permettant de valider, selon les

mesures de performance, la capacité des approches à résoudre certains patterns de transformation.

## 3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

### 3.1. Objet d'étude : les méthodes d'écriture des modèles de transformation

L'ingénierie dirigée par les modèles (« Model-Driven Engineering » MDE) favorise l'utilisation de « modèles » comme concept unificateur pour représenter un objet, un système ou encore une partie d'un système [6]. Selon ses principes, un modèle (M1) est une représentation abstraite de la réalité, tandis que le métamodèle (M2), ou langage de modélisation, est quant à lui le langage qui décrit comment un objet du monde réel est modélisé d'un point de vue structurel et terminologique. De cette façon, un système complexe peut être décomposé en plusieurs métamodèles, ou points de vue, qui procurent une abstraction pour chacune des préoccupations désirées.

Le modèle de transformation est l'élément central d'une architecture MDA. Il est défini par un ensemble de relations d'équivalence qui relient les concepts d'un métamodèle source aux concepts d'un métamodèle cible. Ces relations sont appelées règles de transformation et remplissent la fonction d'interopérabilité structurelle et sémantique entre les différents modèles de données par l'intermédiaire de leur métamodèle [7].

Suivant la Figure 1, les systèmes A et B sont respectivement méta-modélisés par les métamodèles A et B qui procurent la sémantique et la structure des données des deux systèmes. Le système A initie une communication avec le système B par l'intermédiaire de l'espace technique des modèles. Les données du système A sont alors injectées au sein d'un modèle « a » qui sera ensuite transformé suivant les règles de transformation définies par le modèle de transformation. La transformation du modèle « a » aboutira à la création d'un modèle « b » conforme à la sémantique et à la structure du métamodèle B. Les données du modèle « b » seront ensuite extraites puis intégrées au sein du système B.

### 3.2. Caractéristiques de l'objet d'étude : les patterns de transformation

Garantir l'interopérabilité entre les modèles (M1) est une tâche ardue. La mise en relation des concepts provenant de différents métamodèles (M2) est nécessaire. La première étape lorsqu'il s'agit d'établir une transformation entre deux métamodèles est d'identifier les relations de correspondance (i.e. le mappage) entre les éléments des métamodèles (i.e. classes, associations et attributs).

Or, la prolifération des langages de modélisation complexifie grandement leurs capacités à s'interconnecter convenablement et a pour conséquence de pérenniser et d'étendre un écosystème composé de modèles hétérogènes. De nombreux modèles existent et chacun d'eux possède une structure de modélisation et une terminologie particulière entraînant une hétérogénéité sémantique des métamodèles.

L'hétérogénéité sémantique est avant tout provoquée par des perspectives multiples, i.e. des points de vue différents de la donnée [8]. Par conséquent, selon le point de vue, deux concepts sémantiquement similaires peuvent être méta-modélisés (M2) par des structures et des terminologies qui diffèrent selon les domaines. D'autre part, au niveau modèle (M1), la valeur des attributs (ou data) peut, elle aussi, être sujette à une hétérogénéité syntaxique. La valeur d'un attribut peut être écrite de différentes façons (i.e. abréviation, arrondi, conversion...) et complexifie davantage l'identification des relations de correspondance.

Pour mesurer toute la complexité lorsqu'il s'agit d'éditer une transformation de modèle, une compréhension plus approfondie des conflits à résoudre provoqués par l'hétérogénéité des métamodèles est nécessaire. L'étude de ces conflits permet de caractériser les patterns de transformation qui interviennent lors d'une transformation de modèle.

Dans leur article, [9] proposent une classification des types de conflits en deux grandes catégories (1) les conflits de type sémantiques où la terminologie des concepts et la valeur des attributs sont sujettes à de mauvaises interprétations ; (2) les conflits de type structuraux. Dans cette étude, les conflits sémantiques seront classifiés sous forme de conflits (1) terminologiques et syntaxiques ; (2) structuraux.

**Les conflits structuraux.** Selon les métamodèles (M2), une même information peut être représentée par différents concepts. Bien que deux structures de modélisation soient différentes, elles peuvent tout de même véhiculer la même information. Les conflits structuraux peuvent être eux même catégorisés selon deux points de vue :

- Un *conflit structurel interne* se traduit par deux concepts sémantiquement similaires qui ne disposent pas, en totalité ou en partie, des mêmes attributs.
- Un *conflit structurel externe* implique que deux représentations sémantiquement similaires peuvent être entourées par des structures adjacentes (i.e. relation et classes voisines) non-isomorphiques.

Les différents patterns de transformation sont répertoriés dans le Tableau 1.

Tableau 1 - Patterns de transformation

Pattern	Description
[1-1]	Un concept du métamodèle source est transformé en un concept du métamodèle cible.
[n-1] [1-n]	Plusieurs concepts du métamodèle source sont transformés en un unique concept du métamodèle cible. Inversement pour le pattern [1-n].
[n-m]	Plusieurs concepts du métamodèle source sont transformés en plusieurs concepts du métamodèle cible.

Par ailleurs, certains patterns de transformation peuvent être soumis à des conditions pouvant orienter la transformation d'un concept ou d'un groupe de concepts. Nous pouvons alors émettre l'hypothèse que la

transformation est guidée par des caractéristiques dites propres aux concepts.

Tableau 2 - Conditions de transformation

Symbole	Types de condition	Description
$\sigma_r$	Condition sur une relation	La transformation d'une classe peut être conditionnée par une ou plusieurs de ses relations.
$\sigma_a$	Condition sur la valeur d'un attribut de la classe	La transformation d'une classe peut être conditionnée par la valeur d'un ou plusieurs de ses attributs.
$\sigma_c$	Condition sur les classes adjacentes d'ordre 1	La transformation d'une classe peut être conditionnée par une ou plusieurs de ses classes voisines (type de classe ou bien valeur spécifique d'un attribut)

**Les conflits terminologiques.** Au niveau métamodèle (M2), les conflits sémantiques lors du nommage des éléments sont provoqués par l'utilisation de synonymes, d'antonymes ou encore par des granularités différentes lors de la modélisation des données qui font intervenir des hyponymes et des hyperonymes. Des conflits syntaxiques peuvent également intervenir lors de l'utilisation d'abréviations et de conventions d'écriture. Au niveau modèle (M1) la valeur des attributs peut engendrer des conflits sémantiques dans le cas d'opérations mathématiques (conversions des devises, changement d'unités de valeur), ou encore lors d'approximations d'une valeur numérique (arrondies). Des conflits syntaxiques peuvent être induits dans le cas d'une concaténation de valeurs (deux attributs forment un unique attribut) et de formats de données différents (conversion d'une date au format anglais).

**Classification des conflits sémantiques.** La classification proposée n'est pas exhaustive et mérite d'être complétée dans le cadre de futures expérimentations. Cette classification à vocation à servir de socle commun pour caractériser les transformations de modèle. La Figure 3 présente les différents types de conflits répertoriés, à savoir, les caractéristiques qui définissent un modèle de transformation.

Une grille d'évaluation a été construite pour caractériser les modèles de transformation vis-à-vis des conflits structuraux et terminologiques. Son objectif est de simplifier la comparaison des différentes approches en introduisant un cadre de référence qui répertorie les différents patterns de transformation. Le Tableau 3 et le Tableau 4 présentent un échantillon des différents patterns de transformation possibles.

Tableau 3 - Exemple de conflits structuraux

Types	N°	Pattern	Pattern Source	Pattern Cible
Concaténation de classes	(c2)	[n-1]	$\begin{array}{ c } \hline c_1 \\ \hline a_1 = v_1 \\ \hline \end{array} \xrightarrow{r} \begin{array}{ c } \hline c_2 \\ \hline a_2 = v_2 \\ \hline \end{array}$	$f \longrightarrow \begin{array}{ c } \hline c'_1 \\ \hline a'_1 = v_1 \\ a'_2 = v_2 \\ \hline \end{array}$
Concaténation d'attributs	(a2)	[n-1]	$\begin{array}{ c } \hline c_1 \\ \hline a_1 = v_1 \\ \hline \end{array} \xrightarrow{r} \begin{array}{ c } \hline c_2 \\ \hline a_2 = v_2 \\ \hline \end{array}$	$f \longrightarrow \begin{array}{ c } \hline c'_1 \\ \hline a'_1 = v_1 + v_2 \\ \hline \end{array}$

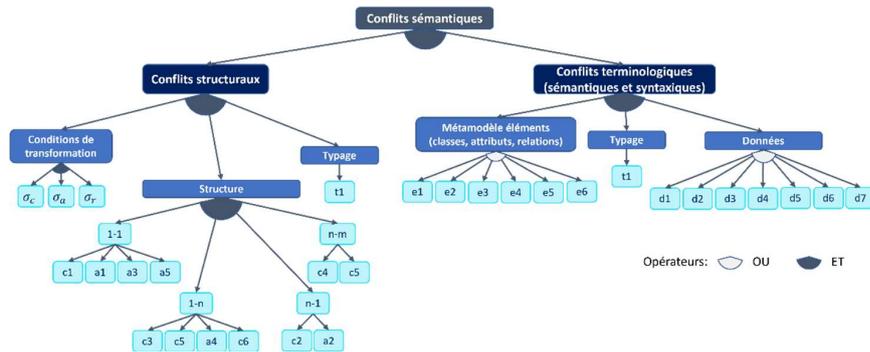


Figure 3 - Classification des conflits sémantiques

Tableau 4 - Exemple de conflits terminologiques et syntaxiques

Eléments	Type	N°
Eléments (M2)	Granularité	(e4)
	Champs lexical/Linguistique	(e6)
Données (M1)	Texte descriptif	(d3)
	Opération mathématique	(d4)

### 3.3. Jeux de données de validation

Dans le cadre des expérimentations pour tester la validité des approches à résoudre certains types de patterns de transformation, des jeux de données ont été identifiés. Les métamodèles des transformations *Families2Persons* et *Class2Relational* du Zoo ATL mis à disposition par la fondation Eclipse ont été utilisés. La transformation *City2TownHall* constituera le troisième jeu de données de validation. Cette dernière a la particularité d'être une transformation bidirectionnelle, i.e. la transformation du métamodèle *Town Hall* vers le métamodèle *City* est possible.

- La transformation *Families2Persons* impose une compréhension des associations qu'entretiennent les classes entre elles. Le seul moyen d'assurer la transformation est de capturer la signification des associations de chacune des classes. De ce fait, il est nécessaire de prendre en compte, non seulement la classe, mais également les types d'associations qu'elles détiennent pour capturer les conditions en relation  $\sigma_r$ .
- La transformation *Class2Relational* nécessite une compréhension de la structure interne des classes. La valeur d'un attribut conditionne la transformation d'une classe ( $\sigma_a$ ). Il est alors important de différencier les classes du même type en fonction des attributs qu'elles détiennent.
- La transformation *City2TownHall* et *TownHall2City*, impose une compréhension de la structure externe des classes. La valeur d'un attribut d'une des classes adjacentes à la classe étudiée conditionne sa transformation ( $\sigma_c$ ). Il est alors important de différencier les classes du même type en fonction des relations

qu'elles entretiennent avec les classes adjacentes.

Le Tableau 5 et le Tableau 6 synthétisent la caractérisation des différentes transformations utilisées à titre de jeux de données de validation.

Tableau 5 - Caractérisation des conflits structureaux des jeux de données

Transformation	Conflits structureaux						
	Patterns de transformation				Conditions de transformation		
	1-1	1-n	n-1	n-m	$\sigma_c$	$\sigma_a$	$\sigma_r$
<i>Families2Persons</i>	-	-	(c2)	-	-	-	x
<i>Class2Relational</i>	(c1)	(c5)	-	(c4)	-	x	x
<i>City2TownHall</i>	(c1)	-	(c2)	(c4)	x	-	x
<i>TownHall2City</i>	(c1)	(c5)	(c2)	(c6)	x	-	x

Tableau 6 - Caractérisation des conflits terminologiques des jeux de données

Transformation	Conflits terminologiques			
	Classes	Relations	Attributs	Données
<i>Families2Persons</i>	(e4)	(e4)	(e3)	-
<i>Class2Relational</i>	(e6)	(e6)	(e6)	-
<i>City2TownHall</i>	(e4)	(e4)(e3)	(e3)	-
<i>TownHall2City</i>	(e4)	(e4)(e3)	(e3)	-

### 3.4. Mesures de performance

Des critères de performance ont été identifiés pour mesurer la capacité des approches à résoudre certains types de patterns de transformation. Les mesures de performances suivantes ont été définies :

Pour la phase d'apprentissage :

- Comme l'objectif d'un modèle de transformation est de minimiser les pertes d'informations lors de la conversion d'un modèle, des métriques telles que le *recall* (R), la précision (P) et la f-mesure ont été utilisées pour mesurer la validité des modèles obtenus après transformation. Ces premiers indicateurs permettent d'évaluer si les règles de

transformation ont correctement été apprises lors de la phase d'apprentissage.

$$F_{\text{mesure}} = 2 \frac{P * R}{P + R} \quad (1)$$

- (2) Les efforts humains :
- En termes de pré-traitement par rapport aux éléments à fournir pour parfaire l'apprentissage des règles de transformation, à savoir les données d'exploitation (le nombre de modèles à fournir ainsi que les éléments complémentaires tel que des pré-alignements).
  - En termes de post-traitement et de validation des règles inférées.
- (3) La durée d'entraînement nécessaire pour apprendre les règles de transformation.

Par rapport à la phase de prédiction, les métriques telle que le *recall*, la précision et la f-mesure seront réutilisées pour vérifier la capacité des règles de transformation précédemment inférées à transformer tout nouveau modèle conforme au métamodèle appris.

## 4. BENCHMARK

### 4.1. Collection expérimentale : état de l'art

Lorsqu'il s'agit d'écrire une transformation de modèle, un mappage entre les éléments d'un métamodèle source et d'un métamodèle cible est nécessaire. Deux catégories d'approches tentent d'automatiser la génération de ce mappage. La première est basée sur les éléments du schéma (métamodèle M2), tandis que la seconde approche est basée sur l'étude des instances (modèles M1), à savoir l'analyse des valeurs des attributs.

Dans cet article nous porterons une attention toute particulière aux approches d'apprentissage des règles de transformation par l'exemple initiée par Varró [10], i.e. qui s'appuient sur des instances de modèles source et cible données en entraînement. Le Tableau 7 répertorie l'ensemble des approches d'apprentissage par l'exemple des modèles de transformation.

**Tableau 7 - Collection expérimentale d'algorithme d'apprentissage par l'exemple des modèles de transformation**

Approches	Algorithmes	Entrées	Sorties
[11]	Programmation Logique Inductive	Modèles source/cible Pré-alignement	Règles
[12][13]	RCA	Modèles source/cible Pré-alignement	Règles
[14]	Programmation Génétique	Modèles source/cible	Règles
[15]	Programmation Génétique	Modèles source/cible Pré-alignement	Règles
[16]	LSTM Encoder/Decoder	Modèles source/cible	Modèle cible
[17]	Apprentissage Q par renforcement	Modèles source/cible	Règles / Modèle cible

## 4.2. Résultats

L'étude comparative menée suit le protocole expérimental établi en section 3 qui a lui-même été appliqué à la collection expérimentale présentée en 4.1. Le jeu de données sélectionné pour réaliser l'étude comparative de cet article est la transformation *Class2Relational*.

Le Tableau 8 synthétise les résultats obtenus lors de l'étude, à savoir la capacité de chacune des approches à pouvoir inférer le modèle de transformation permettant de transformer une instance de modèle de classe en instance de modèle relationnel. Les métamodèles et modèles utilisés ont été construits à partir de d'Eclipse Modeling Framework (EMF) et décrits en suivant le formalisme du méta-métamodèle Ecore.

**Tableau 8 - Etude comparative des approches d'apprentissage des règles de transformation par l'exemple**

Approches	Performances de l'apprentissage			Perf. Prédiction	Niveau	
	Temps (s)	P	R	F		
[11]	?	?	?	?	0	
[12][13]	?	0.9	0.8	0.85	0.93	1
[14]	?	?	0.75	?	?	2
[15]	?	0.94	0.94	0.94	0.94	1
[16]	±1000	1.0	1.0	1.0	1.0	3
[17]	2.5	1.0	1.0	1.0	1.0	3

L'étude précédente suit 4 niveaux d'analyse :

- 0 : les résultats sont difficilement exploitables ou ne sont pas clairement définis.
- 1 : les résultats sont exploitables mais des calculs ont été réalisés.
- 2 : les résultats ont été repris tel qu'ils sont présentés dans l'article.
- 3 : les algorithmes ont été exécutés pour obtenir les résultats.

## 5. DISCUSSION

### 5.1. Un pré-alignement manuel entre les modèles source et cible

La plupart des travaux exploitent un pré-alignement, i.e. des relations de correspondances manuellement préétablies entre les éléments des modèles source et cible. Ce pré-alignement n'est pas toujours évident à fournir, il nécessite souvent un heuristique métier. D'autre part, comme souligné par Burgueño et al. [16] la majeure partie des propositions vise à simplifier la définition des modèles de transformation sans pour autant totalement l'automatiser. Force est de constater que l'impact de l'humain est omniprésent dans le processus de description des modèles de transformation.

### 5.2. Une application des réseaux de neurones

Malgré les résultats très prometteurs présentés par Burgueño et al [16], une approche basée sur l'apprentissage des modèles de transformation par un réseau de neurones semble inapplicable dans le cadre de

l'Industrie 4.0. D'un point de vue technique, un réseau de neurones artificiels requiert un grand nombre de données pour parfaire son entraînement (750 modèles source et cible sont nécessaires pour obtenir une prédiction précise à 100% dans le cas de la transformation *Class2Relational*). D'autant plus que les mappages complexes soumis à des conditions et de types n-m nécessitent davantage de données d'entraînement. La diversité du jeu d'entraînement est un autre facteur limitant qui porte préjudice à l'approche énoncée par Burgueño et al. Le réseau de neurones artificiels est capable de prédire uniquement les scénarios qu'il a auparavant appris. Enfin la durée de l'entraînement dépend grandement du nombre de modèles (pour 4000 modèles la durée de l'entraînement est de 483 secondes), mais aussi du nombre d'éléments par modèles (pour 30 éléments dans un modèle la durée de l'entraînement est de 4060 secondes).

### 5.3. Une approche par renforcement

Comme l'affirme Mnih et al. la performance d'un apprentissage par renforcement repose essentiellement sur la capacité à décrire les caractéristiques qui représentent l'environnement [18]. Dans l'étude [17] chaque classe est représentée par sa forme aplatie pour capturer sa structure interne et adjacente. Cette représentation semble beaucoup trop simpliste lorsqu'il s'agit de tenir compte de dépendances plus lointaines entre les classes (supérieure à l'ordre 2). Par ailleurs, la fonction d'extraction de la représentation des classes est spécifiée par le développeur. De ce fait, de nombreuses caractéristiques essentielles ne sont pas capturées lorsqu'il s'agit d'établir une représentation fidèle des classes (par exemple l'orientation des relations entre les classes...).

## 6. CONCLUSION

Pour répondre aux défis de l'interopérabilité du futur, une approche d'Interopérabilité Dirigée par les Modèles basée sur les modèles de transformation semble être une solution viable. De nombreuses propositions visant l'automation des modèles de transformation ont vu le jour ces dernières années. Cependant ces approches souffrent d'un réel cadre permettant leur comparaison.

Dans cette étude, un protocole expérimental est proposé à la communauté scientifique pour évaluer les nouvelles propositions vis-à-vis des solutions existantes. L'objet d'étude porte sur les modèles de transformation et les méthodes permettant de simplifier l'édition des règles de transformation. Ce protocole contient, des jeux de données, des critères de validation, ainsi qu'une grille d'évaluation pour caractériser les différents patterns de transformation qui interviennent pendant une transformation de modèle.

Une étude comparative des approches existantes a été réalisée suivant le protocole expérimental présenté dans cet article. La discussion des résultats aboutit sur l'importance d'évaluer les efforts humains nécessaire à

fournir lorsqu'il s'agit d'éditer un modèle de transformation en utilisant chacune des approches présentées dans la collection expérimentale. De ce fait, le ratio entre les efforts humains (éléments à fournir à l'algorithme) et la performance finale de l'algorithme est à évaluer.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) ainsi que Thales Alenia Space pour le soutien humain, matériel et financier apportés à leurs travaux.

## RÉFÉRENCES

- [1] D. Chen, « Framework for Enterprise Interoperability », *Enterp. Interoperability INTEROP-PGSO Vis.*, vol. 1, p. 8, 2017.
- [2] C. Agostinho et al., « Towards a sustainable interoperability in networked enterprise information systems: Trends of knowledge and model-driven technology », *Comput. Ind.*, vol. 79, p. 64-76, juin 2016, doi: 10.1016/j.compind.2015.07.001.
- [3] R. O. M. G. Soley, « Model Driven Architecture », *Object Manag. Group*, p. 12, 2000.
- [4] J. Warmer et A. Kleppe, *The object constraint language: getting your models ready for MDA*, Addison-Wesley Professional, 2003.
- [5] G. Zacharewicz, N. Daclin, G. Doumeingts, et H. Haidar, « Model Driven Interoperability for System Engineering », p. 28, 2020.
- [6] J. Bézivin, « On the unification power of models », *Softw. Syst. Model.*, vol. 4, n° 2, p. 171-188, 2005.
- [7] M. L. Zeng, « Interoperability », *KO Knowl. Organ.*, vol. 46, n° 2, p. 122-146, 2019, doi: doi.org/10.5771/0943-7444-2019-2-122.
- [8] F. Zenker et P. Gärdenfors, Éd., *Applications of Conceptual Spaces*. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-15021-5.
- [9] M. Wimmer, G. Kappel, A. Kusel, W. Retschitzegger, J. Schoenboeck, et W. Schwinger, « From the Heterogeneity Jungle to Systematic Benchmarking », in *Models in Software Engineering*, vol. 6627, J. Dingel et A. Solberg, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 150-164. doi: 10.1007/978-3-642-21210-9\_15.
- [10] D. Varró, « Model Transformation By Example », *Model Driven Eng. Lang. Syst.*, p. 15, 2006.
- [11] Z. Balogh et D. Varró, « Model transformation by example using inductive logic programming », *Softw. Syst. Model.*, p. 18, 2009.
- [12] X. Dolques, M. Huchard, C. Nebut, et P. Reitz, « Learning transformation rules from transformation examples: An approach based on Relational Concept Analysis », *14th IEEE Int. Enterp. Distrib. Object Comput. Conf. Workshop*, p. 7, 2010.
- [13] H. Saada, X. Dolques, M. Huchard, C. Nebut, et H. Sahraoui, « Generation of Operational Transformation Rules from Examples of Model Transformations », in *Model Driven Engineering Languages and Systems*, vol. 7590, R. B. France, J. Kazmeier, R. Breu, et C. Atkinson, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, p. 546-561. doi: 10.1007/978-3-642-33666-9\_35.
- [14] M. Faunes, H. Sahraoui, et M. Boukadoum, « Generating model transformation rules from examples using an evolutionary algorithm », in *Proceedings of the 27th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering - ASE 2012*, Essen, Germany, 2012, p. 250. doi: 10.1145/2351676.2351714.
- [15] I. Baki et H. Sahraoui, « Multi-Step Learning and Adaptive Search for Learning Complex Model Transformations from Examples », *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, vol. 25, n° 3, p. 1-37, août 2016, doi: 10.1145/2904904.
- [16] L. Burgueño, J. Cabot, S. Li, et S. Gérard, « A generic LSTM neural network architecture to infer heterogeneous model transformations », *Softw. Syst. Model.*, mai 2021, doi: 10.1007/s10270-021-00893-y.
- [17] Q. Brilhault, E. Yahia, et L. Roucoules, « Digital continuity based on reinforcement learning model transformations », présenté à International Joint Conference on Mechanics, Design, Engineering and Advanced Manufacturing, Ischia, Italie, juin 2022, p. 12.
- [18] V. Mnih et al., « Playing Atari with Deep Reinforcement Learning ». arXiv, 19 décembre 2013. Consulté le: 13 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://arxiv.org/abs/1312.5602>

## Vers un guide de bonnes pratiques pour l'optimisation d'éolienne à axe horizontal

T. Amoretti <sup>a,\*</sup>, F. Huet <sup>a</sup>, P. Garambois <sup>a</sup>, L. Roucoules <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Arts et Métiers, LISPEN, HESAM Université  
2, cours des Arts et Métiers, 13617 Aix-en-Provence, France

\* e-mail : thomas.amoretti@ensam.eu

### 1. INTRODUCTION

Depuis les années 1970, la part de l'énergie renouvelable non hydraulique dans la production mondiale d'électricité ne cesse d'augmenter. En effet cette dernière passe de 36 TWh soit 0,6 % de la production d'électricité en 1973 à 2 909 TWh soit 10,8% en 2019 [1]. Dans cette production, l'énergie d'origine éolienne a une part prépondérante. Elle s'élevait à 1421 TWh en 2019 soit 49% de l'électricité renouvelable [2]. Le recours à l'énergie éolienne s'explique par ses bonnes performances en terme de facteur d'émission (de l'ordre de 14,1 gCO<sub>2</sub>eq/kWh) comparativement aux autres sources de production d'électricité [3]. Cependant, cette technologie est soumise à la variabilité de sa source d'énergie primaire (le vent) ainsi qu'à des problèmes d'efficacité de conversion (facteurs de charges assez faibles) et des limitations d'exploitation (surface occupée). La question de l'efficacité de conversion de l'énergie éolienne se prête particulièrement bien à l'exercice d'optimisation et de nombreuses publications voient le jour sur le sujet dans le but d'étudier et d'optimiser les systèmes de récupération d'énergie éolienne. La Figure 1 souligne le nombre croissant d'articles se rapportant à la thématique de l'optimisation éolienne depuis les années 1970 (Données issues de la base de données de Scopus) et montre une accélération soutenue au début des années 2000 dans le domaine.

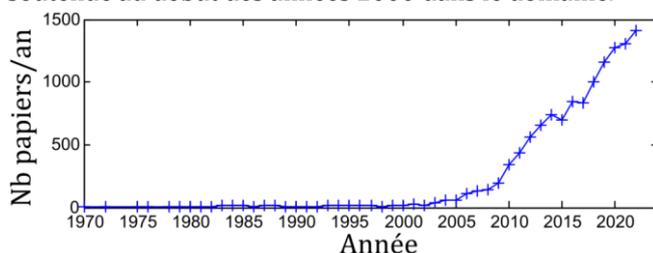


Figure 1 : Évolution du nombre de citations par an sur le sujet : « wind turbine optimization »

La multiplication des études sur le sujet entraîne un grand nombre de cas d'application et de méthodologies souvent hétérogènes. La comparaison des résultats entre les papiers est difficile étant donné la différence des méthodes employées.

L'objet de cette communication est de proposer un cadre permettant d'établir une comparaison entre les différentes approches d'optimisation de l'éolienne à axe horizontal (nous ne traiterons pas de parcs éoliens). Par benchmark on entend ici la proposition d'indicateurs communs servant de référence de comparaison aux résultats d'optimisation de différents articles. Ces derniers peuvent traiter tout ou partie des critères d'évaluation définis, l'objectif étant ici de comparer les méthodes de ces travaux. Le benchmark proposé ici ne concerne pas les algorithmes d'optimisation ou les modèles d'éoliennes mais est bien centré sur la méthode globale d'étude et d'optimisation de l'éolienne, le but n'étant pas de comparer les résultats d'optimisation obtenus mais les méthodes d'obtention desdits résultats.

Le processus d'optimisation d'une éolienne peut être représenté par la Figure 2 :

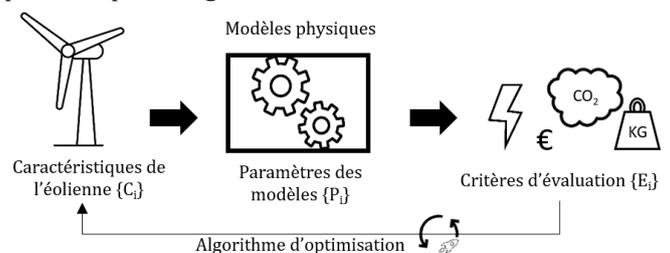


Figure 2 : Représentation schématique du processus d'optimisation

Le principe de base de l'optimisation est de vouloir trouver le meilleur objet (éolienne) possible pour des performances données. La valeur d'un objet est évaluée selon un ou plusieurs critères d'évaluation (ou objectif

d'optimisation). La relation entre ces critères et les caractéristiques intrinsèques de l'objet est donnée via un modèle représentatif de l'objet. Le modèle physique est lui-même régi par un ensemble de paramètres qui lui sont propres. Les inconnues du problème sont ici les caractéristiques de l'éolienne laissées variables. Les benchmarks sur les éléments constitutifs (modèles, algorithmes...) des études sortent du cadre de cette publication. Pour des études sur les différents modèles aérodynamiques voir D. Simms *et al.* [4] qui compare différents modèles avec une expérimentation de référence réalisée par la NREL ou B. Plaza *et al.* [5] pour un projet européen similaire. Pour un benchmark des performances des algorithmes d'optimisation en tant que tel voir les travaux de T. Bartz-Beielstein *et al.* [6].

Dans un premier temps nous développerons la notion de benchmark utilisée ici. Dans un second, temps nous essayerons d'identifier des catégories communes aux mises en œuvre d'optimisation d'éolienne et analyserons les principaux objectifs d'optimisation employés à ce jour. Un cadre de comparaison sera alors proposé avec plusieurs cas d'étude de l'optimisation éolienne. On ouvrira enfin une discussion autour des pratiques de recherche concernant l'optimisation éolienne.

## 2. CARACTERISTIQUES DU BENCHMARK POUR L'OPTIMISATION D'EOLIENNE

### 2.1. Notion de benchmarking en recherche

La notion de benchmark s'est développée en 1989 avec la publication d'un livre par R. Camp : « Benchmarking: The Search for Industry Best Practices that lead to Superior Performance » définissant une méthodologie dans l'amélioration par la comparaison [7]. Une proposition de définition du benchmarking est proposée par J. Moriarty et C. Smallman : « Le benchmarking est un processus téléologique conduit par des exemples, processus opérant dans une organisation avec pour objectif de changer intentionnellement d'une situation donnée vers une meilleure situation » (traduit de l'anglais) [8]. Cette définition rapproche les termes de benchmarking et d'amélioration continue, l'amélioration étant ici consécutive à l'observation d'exemples de bonnes pratiques. Cette méthodologie a, dans un premier temps, été cantonnée au secteur de la gestion et de l'entreprise avant d'essaimer dans le domaine universitaire et plus particulièrement au sein de la recherche scientifique.

Certains domaines scientifiques ont une longue habitude de la pratique du benchmark. Par exemple pour le domaine de l'informatique et plus particulièrement de l'apprentissage machine, les algorithmes de classification non supervisés se réfèrent très régulièrement à la base de donnée Iris de Fischer datant de 1936 [9]. Cette base commune permet de comparer la capacité de classification des algorithmes proposés pour les différentes espèces de fleurs.

Dans le domaine de la recherche en sciences de l'ingénieur plusieurs auteurs se réapproprient la notion de benchmark pour l'appliquer dans leur propre domaine d'étude. Par exemple, R. Piquié en conception [10] ainsi que O. Sigmund en optimisation topologique [11] proposent des outils et bonnes pratiques afin de fournir un cadre de comparaison aux nombreux articles de leurs domaines respectifs. Ce recours au benchmarking provient dans ces deux cas du double constat d'un nombre croissant de travaux proposés ainsi qu'une absence de cadre clair dans le domaine, ce qui conduit à une grande difficulté dans l'évaluation de l'apport des articles. C'est cette acception du benchmark comme proposition de cadre de comparaison qui sera suivie dans le présent article. La question soulevée ici est la suivante : Quel cadre et bonnes pratiques scientifiques pour la comparaison des méthodes d'optimisation d'éolienne à axe horizontal ? C'est ce que nous allons développer par la suite.

### 2.2. Catégories de données de l'optimisation éolienne

Au sein du processus d'optimisation, l'objet d'étude se compose de différentes caractéristiques comme par exemple la taille des pales, les profils aérodynamiques implantés le long de la pale, les matériaux de pale ou encore le type de génératrice utilisée. Les caractéristiques ne sont pas forcément des données purement matérielles ou statiques, elles peuvent aussi comprendre la stratégie de contrôle de l'éolienne (angle d'incidence des pales et/ou charge électrique variables en fonction du vent) ou encore le profil de vent auquel est soumise l'éolienne. Ces caractéristiques peuvent être de différentes natures. Les premières sont les « inconnues » du problème, ce seront les caractéristiques qui vont pouvoir varier afin de donner les résultats optimaux. Ce sont ces caractéristiques que nous cherchons à déterminer. Par exemple on veut trouver la taille de pale idéale de l'éolienne. Il existe également des caractéristiques « connues » du problème. Ces dernières servent à définir le cadre d'étude. Par exemple l'éolienne évolue dans un profil de vent donné et une stratégie de pilotage est sélectionnée en vue d'obtenir le maximum d'énergie sur un temps donné (ici objectif d'optimisation). Une caractéristique peut changer de catégorie. Il est ainsi possible de chercher à déterminer la meilleure stratégie de pilotage pour une éolienne de taille de pale fixe et avec le même profil de vent. On voit que les caractéristiques taille de pale et stratégie de pilotage ont changé de rôle entre les deux optimisations.

Les critères d'évaluation de la performance de l'éolienne ainsi définie peuvent être de différentes natures. Cette diversité de critères d'évaluation est détaillée dans la section suivante. Les valeurs de ces critères d'évaluation sont déterminées à partir des résultats de simulation issus des modèles physiques représentant le comportement d'une éolienne donnée. Par exemple il faut un modèle mathématique qui peut être analytique ou encore issu de calculs CFD pour déterminer

l'énergie produite par une éolienne de rayon donné avec tel profil de vent et telle stratégie de pilotage.

L'algorithme d'optimisation sert quant à lui uniquement à ajuster de manière intelligente les caractéristiques « inconnues » d'une éolienne. On peut par exemple chercher à étudier l'ensemble de combinaisons possibles de caractéristiques « inconnues » afin de déterminer celle maximisant le critère choisi ou on peut utiliser des méthodes de descente de gradient pour arriver plus rapidement à un résultat. Les intervalles dans lesquels ces inconnues peuvent être cherchées (ou espace de recherche) sont déterminés par des contraintes propres au problème. Par exemple on peut vouloir restreindre la taille de pale étant comprise entre 2 et 10 mètres ou vouloir que la contrainte mécanique maximale sur la pale soit inférieure à la limite élastique du matériaux (contrainte calculée à posteriori via un modèle, se ramenant *de facto* à limiter la taille de la pale).

### 2.3. Critères d'évaluation couramment employés

A. Chehouri *et al.* [12] répertorie des études d'optimisation d'éoliennes. Ces travaux font ressortir les principaux axes d'optimisation traités avec en figure de proue le coût de l'énergie (Cost of Energy, CoE), la production énergétique du système (Annual Energy Production, AEP) mais également la masse du système et notamment de la partie comportant les pales. Les critères mentionnés sont parfois la combinaison de plusieurs indicateurs (énergie produite et coût pour le CoE). Nous scinderons les caractéristiques des performances éoliennes comme ceci :

- Evaluation de la production énergétique
- Evaluation du coût
- Evaluation de la résistance structurelle

Chacun de ces domaines peut lui-même être subdivisé en un certain nombre de points. L'évaluation de la production énergétique peut à la fois se faire du point de vue de la puissance extractible (coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne) que de celui de l'énergie produite selon un laps de temps en prenant en compte le profil de vent sur ce temps donné. Du point de vue du  $C_p$  même il est possible d'extraire différents critères de performance comme le  $C_p$  maximal d'une éolienne ou encore la forme de la répartition du  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique de l'éolienne (rapport entre la vitesse tangentielle en bout de pale et la vitesse du vent incident, noté  $\lambda$ ).

Les coûts peuvent être de différentes natures. On pense bien sûr principalement au coût financier, mais il peut aussi s'agir de coût au sens de flux physiques tels que la quantité d'un matériau utilisé, le coût énergétique de fabrication ou encore l'empreinte carbone (équivalent  $CO_2$ ) rejetée. Ces deux derniers peuvent faire partie d'un ensemble plus large prenant en compte les différents impacts environnementaux liés à l'éolienne. L'échelle temporelle sur laquelle se base un critère est également à prendre en compte. Par exemple l'étude de l'ensemble du cycle de vie de l'objet éolien peut modifier la valeur des coûts calculés et introduire de nouveaux critères. Une

analyse de cycle de vie de l'éolien menée par l'ADEME en 2015 répertorie les différents impacts environnementaux de la filière éolienne française avec par exemple le calcul de l'utilisation de la ressource en eau ou bien l'utilisation des sols [13].

Dans son étude, A. Chehouri avance principalement le poids de la pale comme critère d'optimisation structurelle. Mais d'autres critères peuvent être pris en compte comme la résistance en fatigue [14] ou encore la charge aérodynamique appliquée sur la pale [15].

Un autre point qui peut être ici abordé est celui concernant l'impact de l'éolienne sur son milieu direct comme l'écoulement de vent autour de l'éolienne ce qui peut influencer la disposition des éoliennes au sein d'un parc ou au sein d'un territoire [16].

Enfin des problématiques d'intégration au réseau électrique peuvent également faire partie des critères d'évaluation étudiés [17].

## 3. BENCHMARK PROPOSE ET DISCUSSION

Dans la partie précédente nous avons vu que pour effectuer une étude d'optimisation éolienne, l'auteur doit indiquer les éléments suivants :

- Les critères d'évaluation à optimiser
- Les caractéristiques inconnues du problème
- Les caractéristiques connues
- La description des modèles ayant permis d'obtenir les valeurs associées aux critères d'évaluation
- Les contraintes limitant les plages de recherche des caractéristiques inconnues

### 3.1. Comparaison de différents travaux portant sur l'optimisation d'éolienne

Nous allons proposer plusieurs études de référence se positionnant sur différents critères d'évaluation afin d'avoir différents exemples de méthodologie d'optimisation. Ces critères seront consignés dans le Tableau 1. Le Tableau 2 présente les caractéristiques inconnues et connues permettant de définir entièrement l'objet étudié. Le Tableau 3 quant à lui présente les contraintes associées à l'espace de recherche des caractéristiques inconnues. Enfin le Tableau 4 présente les principaux modèles utilisés ainsi que des particularités méthodologiques de chaque article.

Le premier article est celui publié par A. Ning *et al.* [18]. Cette publication présente différentes études d'optimisation indépendantes. Les différents objectifs d'optimisation choisis sont listés dans le Tableau 1. Nous allons ensuite nous concentrer sur le 1<sup>er</sup> cas d'optimisation du COE présenté dans l'étude en question pour le remplissage des autres tableaux.

La seconde étude est celle de L. Wang *et al.* [19]. Les objectifs sont cette fois-ci traités en même temps dans une étude multi objectifs. La troisième étude est celle de Kusiak *et al.* [20]. Dans cet article les auteurs cherchent à optimiser la puissance de sortie ainsi que minimiser les vibrations subies par la structure via la stratégie de contrôle de l'éolienne. Enfin dans la dernière étude de Benini et Toffolo [21], les auteurs cherchent à optimiser à

la fois le coût de l'énergie mais également la densité énergétique d'une éolienne (ramenée à la surface du rotor).

Tableau 1 : Critères de performance investigués

	PE- Puissance de sortie (W)	PE- Coefficient de puissance Cp	PE -AEP (kWh)	C - CoE (\$/kWh)	RS - Masse rotor	RS - Masse totale	RS - Vibration de l'arbre de transmission	RS - Vibration de la tour	H - Masse totale /AEP	IL - Densité énergétique
Ning et al. [18]		X/H	X	X	X	H			H	
Wang et al. [19]	0					0				
Kusiak et al. [20]	0						0	0		
Benini [21]				0						0

PE : Production énergétique  
C : Coût  
RS : Résistance structurelle  
IL : Impact sur le milieu local

X : optimisation mono-objectif  
O : optimisation multi-objectifs  
H : Hybride : Optimisations mono-objectif menées successivement ou multi-objectif pondéré

Tableau 2 : Caractéristiques des éoliennes étudiées

	CI- Cordes le long de la pale (m)	CI- Angles le long de la pale (rad)	CI- Epaisseur de l'enveloppe (tête de longeron) (m)	CI- Epaisseur du profil (m)	CI- Vitesse spécifique ( $\lambda$ )	CI- Angle de calage en fonction du temps (rad)	CI- Couple sur l'arbre mécanique en fonction du temps (N.m)	CI- Vitesse linéaire en bout de pale (m/s)	CI- Ratio rayon pale/rayon moyen	CF- Stratégie de contrôle	CF- Diamètre (m)	CF- Profils le long de la pale	CF- Matériaux	CF- Puissance nominale génératrice	CF- Distribution de vents	CF- Données aérodynamique (fluides)	CF- Données aérodynamique (profils)	CF- Nombre de pales	CF- Distribution épaisseur enveloppe	CF- Angle conicité (rad)	CF- Angle lacet (rad)	CF- Vents de démarrage et arrêt (m/s)
Ning et al. [18]	X	X	X		X					X	X	X	X	X	X	X	X					
Wang et al. [19]	X	X		X						X	X	X	X	X	X	X	X					X
Kusiak et al. [20]						X	X								X							
Benini [21]	X	X						X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X

CI : Caractéristique inconnue  
CF : Caractéristique fixée (connue)

Tableau 3 : Contraintes appliquées

	S- Déformation maximale	S- Flambement enveloppe en tête de longeron	S- Déflexion du bout de pale à la vitesse nominale (m)	S- Fréquence naturelle pale (Hz)	S- Fatigue du pied de pale (Pa)	S- Effort maximal (N)	S- Contrainte maximale (Pa)	S- Epaisseur d'enveloppe (m)	P- épaisseur (m)	P- Angles (rad)	P- Cordes (m)	P- Couple (N.m)	P- Ratio de rayons (pale/moyeu)	SO- Vitesse max bout de pale (m/s)	A- Vitesse rotation max (tr/min)	A- Taux max variation angle entre deux pas temps	A- Taux max variation angle entre deux pas temps	A- Coefficient induction axiale
Ning et al. [18]	X	X	X	X	X									X				
Wang et al. [19]						X	X		X	X	X				X			
Kusiak et al. [20]										X		X				X	X	
Benini [21]								X					X	X				X

S : Structurale  
P : Plage de valeur fixée  
SO : Sonore  
A : Autres

Tableau 4 : Méthodologie des études et modèles

	CPE- Performances aérodynamiques	CPE- Performances mécaniques	CPE -Autres pertes	AS- Calcul contraintes et déformations	AS- Inerties et rigidités	AS- Modèle vibration (arbre + tour)	CC- Financier	M- Calcul éolienne étalon	M- Description paramétrage algorithme d'optimisation	AO - Algorithme d'optimisation utilisé
Ning et al. [18]	X	X	X	X	X		X	X	Descente de gradient (Matlab)	CPE : Calcul production énergétique AS : Analyse structurelle CC : Calcul du coût H : Hybride M : Méthodologie AO : Algorithme d'optimisation
Wang et al. [19]	X			X					NSGA-II modifié	NSGA-II : Non-sorted Genetic Algorithm 2
Kusiak et al. [20]	X					X		X	SPEA	SPEA : Strength Pareto Evolutionary Algorithm
Benini [21]	X						X	X	MOEA	MOEA : Multi Objective Evolutionary Algorithm (développé par les auteurs)

### 3.2. Discussion

On peut voir à travers ces tableaux des similitudes mais également des différences dans la manière avec laquelle les études d'optimisation éolienne sont menées. Le tableau 1 nous montre qu'il existe différents critères sur lesquels se basent les auteurs pour juger de l'amélioration de leur éolienne. Ces critères sont de différentes natures mais un même critère peut être utilisé de différentes manières (optimisation mono-objectif/multi-objectif/hybride). Le second tableau nous montre que les caractéristiques inconnues de l'éolienne sont plutôt propres à chaque auteur, en fonction de l'objectif d'optimisation qu'il s'est fixé. Néanmoins les caractéristiques connues sont globalement communes à tous les auteurs : tous ont besoin de définir certains aspects de l'éolienne, même fixes, afin de pouvoir utiliser les modèles physiques de calcul de performance. On remarque qu'aucun auteur ne mentionne les caractéristiques aérodynamiques propres au fluide utilisé (masse volumique, viscosité) ce qui a pourtant un impact sur les résultats obtenus. Le tableau 3 nous montre que les contraintes appliquées à la recherche d'optimum sont assez différentes en fonction des auteurs. Enfin la table 4 nous montre que des éléments communs sont utilisés (choix de l'algorithme, choix du modèle physique, description du paramétrage de l'algorithme) mais que les algorithmes spécifiques utilisés sont très différents aussi bien pour le modèle que pour l'optimisation.

La nature des modèles utilisés peut être variable depuis le modèle créé par l'auteur jusqu'à l'utilisation d'un modèle open source. Il est parfois compliqué pour certaines études d'entrer dans le détail de la paramétrisation des modèles utilisés. Parfois les plages de contraintes des caractéristiques à optimiser sont fournies sans discussion particulière à ce sujet. De plus, la finesse des modèles requière une définition plus ou moins précise du cadre d'étude. Il y a donc également une grande diversité dans les méthodologies utilisées pour obtenir les courbes aérodynamiques de chaque profil de pale dans le cas de profils non standards ou la définition

précise de la composition des matériaux composite constituant la pale.

Une seule des études concernées définit une éolienne de référence [18]. C'est à dire la définition de caractéristiques complètes ainsi que du calcul de performances via les modèles développés dans l'article. Dans le cas de A. Ning, l'éolienne de référence est issue d'une étude de performance expérimentale [22]. Ceci permet dans un premier temps de valider les modèles utilisés en comparant l'éolienne calculée à celle de la littérature. Dans un deuxième temps ceci permet de comparer les éoliennes issues du processus d'optimisation avec l'éolienne de référence, permettant de juger de la réelle optimisation du système. Il pourrait également être judicieux de prendre comme référence une éolienne dont les caractéristiques ont été préalablement optimisées dans un précédent article afin de comparer les résultats d'optimisation obtenus avec ceux d'une méthode d'optimisation similaire et ainsi juger de l'apport de la nouvelle méthode.

Il serait intéressant pour l'ensemble de la communauté scientifique d'avoir accès aux codes utilisés pour les optimisations proposées. Ceci permettrait de comprendre en détail le paramétrage du problème et permettrait d'implémenter plus facilement des modifications dans le processus d'optimisation en prenant par exemple en compte un nouveau phénomène dans les modèles physiques sans avoir nécessairement à reconstruire l'ensemble du modèle pour chaque ajout/modification.

Les algorithmes ici utilisés font appel à des processus itératifs. Néanmoins il n'est fait état dans aucun papier d'étude de convergence justifiant que la paramétrisation de l'algorithme d'optimisation est convenable pour le problème en question.

Certains auteurs excluent toutes considérations des aspects mécaniques et électriques de l'éolienne, ces derniers pouvant néanmoins avoir des impacts notamment sur les contraintes de vitesse ou couple maximum admissibles par le système. La question des limites appliquées au système devrait être normalisée puisqu'en fonction des contraintes choisies par l'auteur les résultats de l'études deviennent complètement différents ce qui nuit à la comparaison entre études.

### 3.3. Synthèse

Le travail présenté reprend les différents attributs nécessaires à l'optimisation d'éolienne. L'étape succédant naturellement à ce travail serait de partir d'une optimisation de référence puis mener différentes optimisations en modifiant l'un des attributs (objectifs, modèles ou algorithmes d'optimisation) afin de comparer les caractéristiques trouvées. Pour réaliser ce benchmark à proprement parler, les auteurs ont synthétisés les caractéristiques propres à l'étude de Ning [18] disponibles à l'adresse suivante : [https://github.com/p36cl/base\\_benchmark\\_optimisation\\_eolienne](https://github.com/p36cl/base_benchmark_optimisation_eolienne)

## 4. CONCLUSION

Cet article s'attache à définir un benchmark pour l'optimisation éolienne. Ce dernier présente ici les caractéristiques communes des articles concernant l'optimisation d'éolienne. Ces caractéristiques communes sont la définition des critères d'optimisation, la définition des variables du problème d'optimisation ainsi que des contraintes associées. Cela comprend également la définition de l'ensemble des éléments fixés du problème, ceci permettant la reproductibilité de la démarche. Enfin le dernier point commun de ces études est la définition des différents modèles utilisés. La notion de benchmark est de plus en plus utilisée dans le domaine de la recherche scientifique afin de s'inspirer/ définir les bonnes pratiques pour contribuer efficacement à un domaine d'étude. Les articles choisis ont pour vocation d'être suffisamment divers en termes d'objectifs et de méthodes étudiés pour être représentatifs des études d'optimisation éolienne en général. Ce qui ressort de ce benchmark des méthodes d'optimisation de l'éolien c'est que bien que les objectifs d'optimisation puissent être très différents selon les auteurs, les mêmes objets ont besoin d'être définis par tous (caractéristiques de l'éolienne testée, modèle physique utilisé, etc...).

Ce qui se dégage de cette étude c'est que chaque auteur a tendance à reconstruire l'ensemble des éléments pour mener à bien son optimisation et que tous les éléments de cette reconstruction ne sont pas nécessairement fournis. Cela conduit à une grande diversité dans les études, une difficulté dans la reproductibilité et ne permet pas de juger opportunément de la validité de l'apport propre à l'auteur (par exemple nouveau modèle physique pour l'optimisation ou nouvelle caractéristique éolienne non prise en compte). Tout comme il existe des études expérimentales de référence pour le domaine de la modélisation éolienne, il pourrait être bon d'identifier une ou des méthodes d'optimisation de référence afin d'avoir un protocole d'optimisation clair ainsi qu'une comparaison de résultat possible avec les nouvelles approches proposées. C'est dans une certaine mesure ce que propose Ning dans son article [18].

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par la région SUD, Provence-Alpes Côte d'Azur (France). Les auteurs tiennent à remercier vivement la région SUD pour son soutien.

## RÉFÉRENCES

- [1] IEA, « Key World Energy Statistics 2021 », IEA, Paris, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>
- [2] « Renewable Electricity – Analysis », IEA. <https://www.iea.org/reports/renewable-electricity> (consulté le 28 novembre 2022).
- [3] « ADEME - Site Bilans GES ». <https://bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/liste-element/categorie/71/siGras/1> (consulté le 28 novembre 2022).
- [4] D. Simms, S. Schreck, M. Hand, et L. Fingersh, « NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: a Comparison of Predictions to Measurements », janv. 2001, doi: 10.2172/783409.
- [5] B. Plaza, R. Bardera, et S. Visiedo, « Comparison of BEM and CFD results for MEXICO rotor aerodynamics », *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, oct. 2015, doi: 10.1016/j.jweia.2015.05.005.
- [6] T. Bartz-Beielstein et al., *Benchmarking in Optimization: Best Practice and Open Issues*. 2020.
- [7] R. Mann, « Expert Point of View Note The History of Benchmarking and Its Role in Inspiration », 2015.
- [8] J. P. Moriarty et C. Smallman, « En route to a theory of benchmarking », *Benchmarking Int. J.*, juill. 2009, doi: 10.1108/14635770910972423.
- [9] R. A. Fisher, « The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems », *Ann. Eugen.*, 1936, doi: 10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x.
- [10] R. Pinquie, J. L. Duigou, L. Grimal, et L. Roucoules, « An open science platform for benchmarking engineering design researches », *Procedia CIRP*, janv. 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.280.
- [11] O. Sigmund, « On benchmarking and good scientific practise in topology optimization », *Struct. Multidiscip. Optim.*, oct. 2022, doi: 10.1007/s00158-022-03427-2.
- [12] A. Chehour, R. Younes, A. Ilinca, et J. Perron, « Review of performance optimization techniques applied to wind turbines », *Appl. Energy*, mars 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.043.
- [13] « 151126-cycleco-ademe-acv-de-la-production-d'electricite-d'origine-eolienne-en-france.pdf ». Consulté le: 29 novembre 2022. [En ligne].
- [14] W. Hu, K. K. Choi, et H. Cho, « Reliability-based design optimization of wind turbine blades for fatigue life under dynamic wind load uncertainty », *Struct. Multidiscip. Optim.*, oct. 2016, doi: 10.1007/s00158-016-1462-x.
- [15] J. Jeong, K. Park, S. Jun, K. Song, et D.-H. Lee, « Design optimization of a wind turbine blade to reduce the fluctuating unsteady aerodynamic load in turbulent wind », *J. Mech. Sci. Technol.*, mars 2012, doi: 10.1007/s12206-011-1106-4.
- [16] G. Mosetti, C. Poloni, et B. Diaviacco, « Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm », *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, janv. 1994, doi: 10.1016/0167-6105(94)90080-9.
- [17] B. Rabelo et W. Hofmann, « Power Flow Optimisation and Grid Integration of Wind Turbines with the Doubly-Fed Induction Generator », in *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, juin 2005, doi: 10.1109/PESC.2005.1582050.
- [18] A. Ning, R. Damiani, et P. Moriarty, *Objectives and Constraints for Wind Turbine Optimization*, doi: 10.2514/6.2013-201.
- [19] L. Wang, T. Wang, et Y. Luo, « Improved non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA)-II in multi-objective optimization studies of wind turbine blades », *Appl. Math. Mech.*, juin 2011, doi: 10.1007/s10483-011-1453-x.
- [20] A. Kusiak, Z. Zhang, et M. Li, « Optimization of Wind Turbine Performance With Data-Driven Models », *IEEE Trans. Sustain. Energy*, juill. 2010, doi: 10.1109/TSTE.2010.2046919.
- [21] E. Benini et A. Toffolo, « Optimal Design of Horizontal-Axis Wind Turbines Using Blade-Element Theory and Evolutionary Computation », *J. Sol. Energy Eng.*, nov. 2002, doi: 10.1115/1.1510868.
- [22] J. JM, S. Butterfield, W. Musial, et G. Scott, « Definition of a 5MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development », *Natl. Renew. Energy Lab. NREL*, janv. 2009, doi: 10.2172/947422.

# Impact de méthodes d'analyse de données pour améliorer le pronostic de défaillance moteur à partir de séries temporelles multivariées

M. Suhas <sup>a,\*</sup>, E. Abisset-Chavanne <sup>b</sup>, P.-A. Rey <sup>b</sup>, F. Dèschamps <sup>c</sup>

<sup>a</sup> AMValor, Laboratoire I2M, Bordeaux, France

<sup>b</sup> Arts et Métiers, Laboratoire I2M, Bordeaux, France

<sup>c</sup> LGM, Toulouse, France

\* e-mail : [morgane.suhas@ensam.eu](mailto:morgane.suhas@ensam.eu)

## 1. INTRODUCTION

**Contexte :** La motivation de ce travail provient d'une problématique industrielle. Pour surveiller l'usure dans un système industriel, des signes précurseurs de défaillance peuvent être identifiés au sein des données relevées sur le système. Elles sont indispensables pour la construction des modèles visant à prédire les défaillances des systèmes puisqu'elles retracent leur historique et garantissent de ce fait un suivi fiable des systèmes. Cependant, lorsque l'on cherche à transposer ces modèles, possédant des performances satisfaisantes, sur d'autres systèmes, on peut constater des écarts de performances. Ces cas-là se présentent la plupart du temps quand les données d'entrée sur lesquelles a appris le modèle sont trop éloignées des données réellement remontées. Le problème provient alors de l'extrapolation des données d'entrée, c'est-à-dire que le modèle n'arrive pas à généraliser ses capacités de prédictions sur de nouveaux jeux de données d'entrée. Il peut ainsi être utile de

développer des méthodes basées sur la réduction des données d'entrée. En effet, les multiples données récoltées sur le système peuvent présenter des redondances ou des informations non essentielles, qui peuvent fausser la phase d'apprentissage. Le passage de bases de données complètes à des bases de données réduites permet de synthétiser l'information essentielle dans le but de réaliser des projections de nouvelles données dans ces bases. Si les bases réduites sont bien définies, la projection des données extrapolées apportera une meilleure prédiction des défaillances des systèmes. La réduction de la dimensionnalité vise à projeter les données d'un espace à haute dimension en représentations à basse dimension par l'extraction, l'élimination ou la sélection de caractéristiques. La réduction de la dimensionnalité doit cependant respecter les similitudes entre les différentes données d'entrée. L'objectif est de mettre en place un modèle capable de prédire le comportement de l'usure d'un moteur électrique en particulier mais qui puisse toutefois

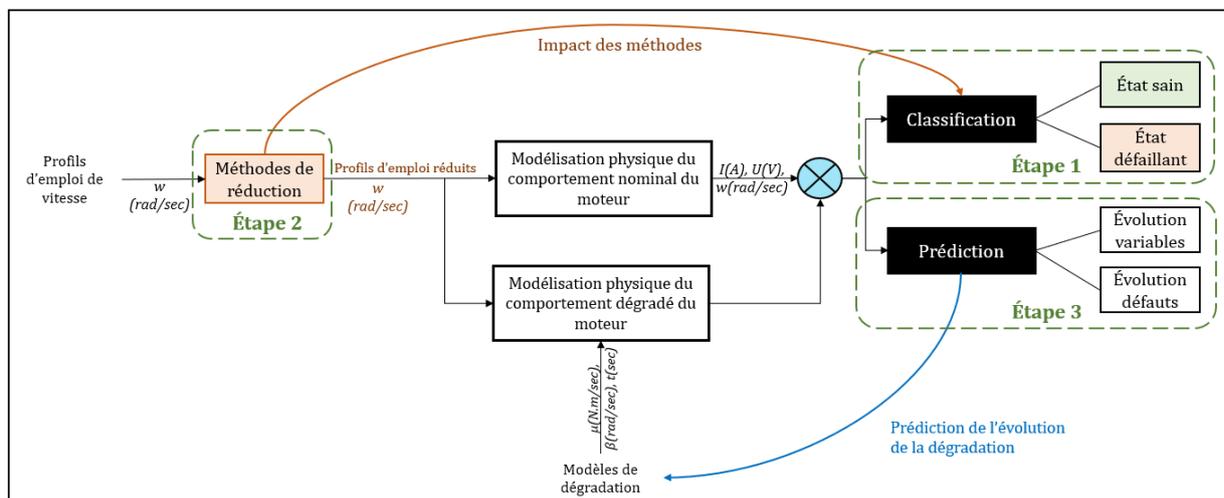


Figure 1 - Schéma de la méthode mise en place

s'adapter sur un autre moteur présentant d'autres conditions d'usage, avec des performances de prédiction équivalentes. L'enjeu sera donc, d'une part, d'entraîner le modèle prédictif sur une base de données d'entrée réduites, pour augmenter les capacités d'extrapolation et de généralisation lorsque le modèle sera face à de nouvelles données d'entrée. De plus, en réduisant la taille de l'espace des données d'entrée, les techniques de réduction de la dimensionnalité permettront d'ajouter de l'interprétabilité entre les données d'entrée et les résultats fournis par les modèles prédictifs [11]. D'autre part, la méthodologie devra intégrer les connaissances physiques du système dans le but de créer tout de même un modèle de pronostic de défaillances spécifique au système.

**Démarche :** Le développement de la méthode présentée dans ce papier comprend trois phases (voir figure 1). La première phase concerne la mise en place d'un modèle de classification non prédictif (étape 1 de la figure 1). Il a été construit lors d'un travail préliminaire [1] et permet de diagnostiquer les défauts du roulement du moteur. On le qualifie de modèle hybride puisqu'il s'appuie à la fois sur les modèles physiques du moteur et sur les données réelles du système [8,12,13,14]. En effet, le comportement réel du moteur électrique est représenté grâce à une modélisation multi-physique via le logiciel MATLAB avec des simulations de 20 secondes. Afin de comprendre et de maîtriser l'impact des défauts sur le comportement du moteur, des défaillances ont été introduites dans le modèle du moteur via des modèles physiques de comportement. Dans ce travail, ces derniers, utilisés pour modéliser les défaillances du moteur sont des couples résistants évoluant dans le temps. Les données d'entrée pour les modèles physiques du moteur (modèle sain et modèle dégradé) sont des séries temporelles représentant les profils de vitesse du moteur. Elles sont générées en variant les amplitudes et les fréquences des signaux temporels constituant les profils d'entrée. Les données de sortie des modèles physiques du moteur sont l'intensité, la tension et la vitesse de rotation. Le modèle hybride identifie en sortie le comportement du moteur, à savoir un comportement sain ou un comportement défaillant à partir des résidus entre les données de sortie du modèle dégradé et celles du modèle en comportement sain. Le modèle de classification a été construit à l'aide d'un réseau de neurones. Il localise un défaut s'étant déjà produit sur le moteur mais ne permet pas de prédire son évolution. L'étape 2 de la méthode (voir figure 1) concerne la partie réduction des données d'entrée afin de mieux extrapoler de nouveaux profils d'emploi du moteur. L'impact de cette réduction des données d'entrée sera également évalué. La troisième phase (étape 3 de la figure 1) s'attache à la prédiction de l'évolution des liens existants entre les variables relevées en sortie du modèle et les paramètres d'usure injectés artificiellement dans le modèle.

Ainsi, dans ce travail, nous discuterons dans un premier temps de plusieurs méthodes de réduction de la dimensionnalité pour réduire la taille des données d'entrée dans l'algorithme de classification. Nous verrons par la suite l'impact de ces méthodes sur la détection des défauts. La démarche pour prédire l'évolution de l'usure

selon l'évolution des grandeurs physiques de sortie du système sera développée dans une dernière partie.

## 2. METHODES DE REDUCTION DIMENSIONNELLE SUR DONNEES D'ENTREE

Les méthodes de réduction dimensionnelle sont utiles pour visualiser et traiter les ensembles de données de grande dimension, tout en conservant autant de variance que possible dans l'ensemble de données [9,16]. Ce travail a pour objectif de définir les bases réduites pertinentes pour la prédiction de défaillance (étape 2 de la figure 1). Effectivement, l'objectif est de trouver une base réduite des données qui explique toute la variabilité des données d'entrée. La pertinence de cette base pour la prédiction de la défaillance sera vérifiée a posteriori.

Pour cette première étude, les données utilisées seront des données synthétiques créées à partir d'un modèle physique sain puis dégradé pour se rapprocher des données réelles. Ces données d'entrée représentent les différents profils d'emploi que peut subir le moteur lorsqu'il est en marche. Initialement, la base des données d'entrée est constituée de 270 profils de vitesse.

### 2.1. Filtrages passe-bas et passe-haut

L'étude va se porter sur l'importance des fréquences des signaux d'entrée, après avoir étudié les spectres qui contribuaient majoritairement à la variabilité des données. La méthode appliquée consiste à filtrer les signaux d'entrée par un filtre passe-bas dans un premier temps. Les hautes fréquences, c'est-à-dire les fréquences supérieures à la fréquence de coupure choisie, sont supprimées pour ne garder que les basses fréquences. Le choix de la fréquence de coupure s'est fait après étude de la répartition des spectres des signaux d'entrée. Elle a été sélectionnée comme la fréquence moyenne des spectres. Les signaux basses fréquences sont reconstruits dans le domaine temporel grâce à la Transformée de Fourier rapide inverse (voir figures 2 et 3) et injectés dans le modèle hybride en tant que données d'entrée. Le signal filtré reconstruit depuis le domaine fréquentiel équivaut au signal filtré dans le domaine temporel. De manière

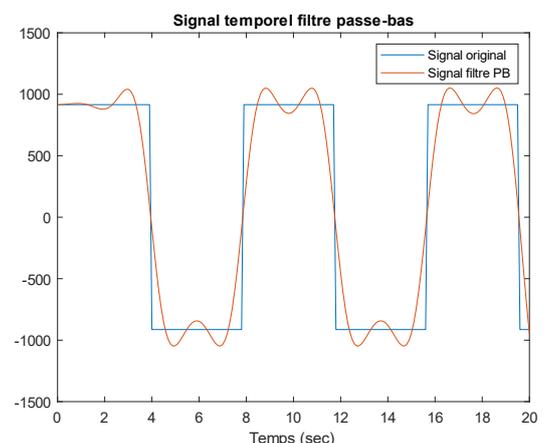


Figure 2 - Exemple de signal d'entrée filtré dans le domaine temporel

analogue, les signaux d'entrée sont filtrés dans un deuxième temps à l'aide d'un filtre passe-haut puis sont également reconstruits dans le domaine temporel [7].

## 2.2. Transformée de Fourier Discrète

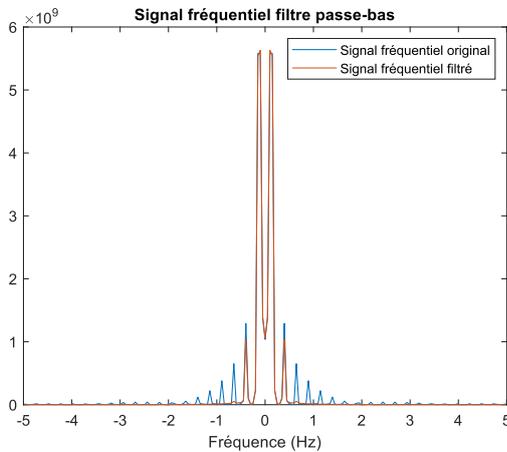


Figure 3 - Exemple de signal d'entrée filtré dans le domaine fréquentiel

Pour réduire la base initiale des signaux d'entrée, on peut procéder à la comparaison du contenu fréquentiel des signaux. Les séries temporelles sont transformées dans le domaine fréquentiel selon leur spectre via la Transformée de Fourier Discrète (TFD), définie telle que ci-dessous [10].

Prenons un signal  $x[n]$  contenant  $N$  échantillons. Sa TFD est alors définie par :

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, 0 \leq k \leq N-1$$

La TFD est appliquée à l'ensemble des signaux d'entrée. Les pics, correspondants aux harmoniques, sont identifiés sur chaque spectre de chaque signal et leurs fréquences respectives sont récupérées. Pour identifier les pics, un seuil d'amplitude minimale entre le pic mis en évidence et ses voisins est défini. Le seuil a été choisi de manière à ne

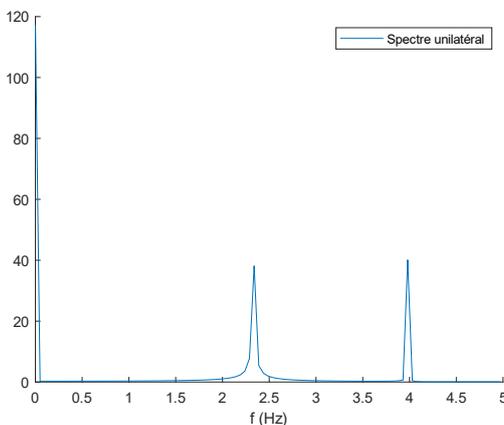


Figure 4 - Exemple de spectre unilatéral correspondant à un profil d'emploi du moteur

garder que les pics les plus importants pour la caractérisation du spectre sans suppression d'information. Une limite des 10 premières harmoniques est fixée pour l'analyse du spectre. Les spectres redondants sont supprimés pour ne garder que ceux présentant un contenu fréquentiel unique. 172 spectres uniques contenant plusieurs pics sont ainsi retenus. Leur indice est récupéré et les signaux uniques sont isolés dans la base des données d'entrée initiale.

## 2.3. Décomposition en Valeurs Singulières & Analyse en Composantes Principales

Une autre méthode communément employée dans la réduction dimensionnelle est la méthode de décomposition en valeurs singulières (SVD) [4]. C'est une technique non paramétrique qui permet d'exprimer une matrice  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$  à l'aide de 2 matrices orthogonales  $U = [u_1, u_2, \dots, u_m] \in \mathbb{R}^{m \times m}$  et  $V = [v_1, v_2, \dots, v_m] \in \mathbb{R}^{n \times n}$  telles que :

$$A = U \Sigma V^T.$$

Où  $\Sigma = [diag(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q), 0]$ ,  $O$  est une matrice nulle et  $q = \min(m, n)$ . Les paramètres  $\{\sigma_i\}$  ( $i=1, 2, \dots, q$ ) sont les valeurs singulières de  $A$  et  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_q > 0$ .

La SVD a été appliquée sur la base des données d'entrée initiale mais la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) aurait également pu être employée. Effectivement, les 2 techniques sont intimement liées. L'ACP fonctionne en trouvant les vecteurs propres de la matrice de covariance et en les classant par leurs valeurs propres respectives. Ces dernières sont les carrés des valeurs singulières trouvées par la SVD [3,10].

Pour estimer le nombre de signaux d'entrée à conserver pour entraîner le modèle hybride, on applique la méthode SVD sur l'ensemble des signaux. Les valeurs diagonales de la matrice  $S$  obtenues constituent le spectre des valeurs singulières (figure 5). Quant à l'amplitude d'une valeur singulière, elle reflète son importance pour expliquer les données. D'après la figure 5, ce sont les 30 premiers modes des signaux qui ont le plus d'importance pour expliquer les données sans perdre d'informations dans le contenu fréquentiel. Par la suite, on pourra se limiter aux

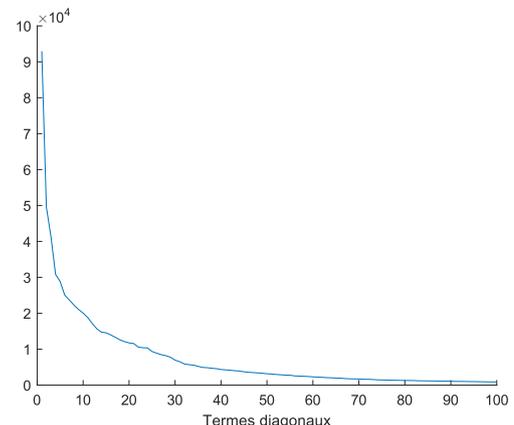


Figure 5 - Energie des modes des signaux d'entrée

10 premiers modes (d'après la figure 5). Les 30 signaux d'entrée qui expliquent le mieux la variabilité des données sont alors reconstruits dans le domaine temporel [5]. Après avoir décrit et testé les méthodes une à une, les méthodes de réduction dimensionnelle sont combinées. Une fois que la TFD a transformé les signaux d'entrée en spectres, on cherche à savoir ceux qui sont les plus influents. Pour cela, la méthode de l'ACP est appliquée sur ces spectres. L'analyse des spectres les plus influents est ensuite réalisée grâce à l'ACP. Elle met en évidence des familles de spectres en explorant les liaisons linéaires sur l'ensemble des spectres. Cela revient à résoudre un problème de maximisation de la variance de projection des données.

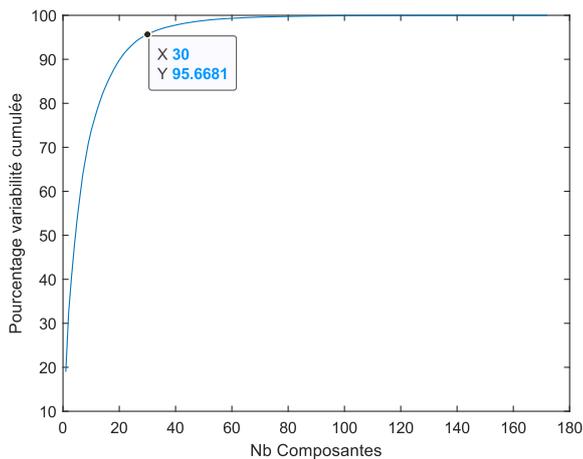


Figure 6 - Variabilité cumulée des spectres après ACP

On remarque sur la figure 6, qu'après application de l'ACP sur les spectres obtenus via TFD, on retrouve les résultats obtenus précédemment avec la SVD, à savoir que les 30 premières composantes suffisent à expliquer plus de 95% de la variabilité des 270 profils d'utilisation. On en conclut qu'en diminuant de 90% le nombre des signaux d'entrée constituant la base d'apprentissage du modèle prédictif, l'information essentielle contenue dans les données initiales est conservée. Par la suite, une analyse des fréquences des premières harmoniques de chaque spectre a permis de confirmer une faible plage de répartition des fréquences. Cela pourrait expliquer que les 30 premières composantes sont suffisantes pour expliquer la variabilité des données.

### 3. IMPACT DES METHODES DE REDUCTION DES DONNEES SUR LA DETECTION DES DEFAUTS

Après avoir décrit les méthodes de réduction dimensionnelle mises en place, il s'agit de vérifier que le modèle parvient à obtenir les mêmes performances de classification avec les bases réduites des données d'entrée. En premier lieu, on vérifie qu'en exprimant des nouvelles données d'entrée dans les bases de données trouvées dans cette section, le modèle parvient à s'adapter rapidement. Les nouvelles données sont des nouveaux signaux d'entrée pour le modèle, produites en modifiant les fréquences, les amplitudes et les types de

signaux afin d'obtenir des profils d'entrée différents de ceux existants dans la base de données initiale. Pour les exprimer dans les bases de données réduites, on construit une base orthonormée pour l'espace des colonnes de A (matrice des données après réduction via la SVD) en utilisant les 30 colonnes de U qui correspondent aux valeurs singulières non nulles les plus influentes pour le jeu de données initial (des 270 profils d'utilisation du moteur). Les nouvelles données B sont ensuite projetées dans cette base orthonormée et forment la matrice C. C est une représentation de la matrice B dans l'espace des colonnes de U. Pour comprendre ce que signifie C dans l'espace initial, c'est-à-dire dans l'espace temporel, on multiplie les colonnes de C par la base orthonormée [15]. Ces données sont par la suite injectées dans le modèle hybride de classification des défauts du moteur. La classification de ces données projetées produit un RMSE de 7.23. En deuxième lieu, on utilise les données d'entrée réduites pour la phase d'apprentissage du modèle hybride et on teste la classification des défauts sur la base de données complète. On s'assure par conséquent que les performances avec les données réduites sont conformes aux résultats obtenus avec une phase d'apprentissage sur une base de données complète.

Les méthodes sont comparées selon leur précision finale en fin de phase d'apprentissage et selon le critère RMSE (Root-Mean-Square Error) calculé sur les données de test. Le critère RMSE évalue la distance moyenne entre les valeurs prédites par l'algorithme de classification et les valeurs réellement observées sur le système modélisé du moteur. Pour notre cas d'étude, il renvoie la différence de temps en secondes de prédiction entre l'apparition des premiers signes de défaillance classifiés et ceux réellement observés. Pour comparer les résultats de la méthode SVD avec les résultats de l'ACP sur la TFD, les 30 scores des composantes principales qui expliquent le mieux la variabilité dans les données sont reconstruits grâce à la Transformée de Fourier Inverse. Les scores des composantes principales sont les représentations des spectres des données d'entrée dans l'espace des composantes principales. Après reconstruction, les signaux vont servir de données d'entrée pour le modèle hybride.

Tableau 1 - Comparaison des méthodes de réduction de données

Méthode de réduction appliquée	Précision finale (%)	RMSE	Nombre de profils retenus
Aucune	96.27	6.12	270
TFD	94.15	7.60	172
SVD/ACP	93.87	6.98	30
ACP + FFT	85.14	9.1	30
Hautes fréquences	98.76	8.55	243
Basses fréquences	98.89	8.54	243

La réduction dimensionnelle a permis la construction de bases réduites à partir des données d'entrée tout en observant des performances similaires avec le modèle hybride. Plus précisément, le modèle est capable de classer les nouvelles séries temporelles selon le comportement du moteur observé avec un nombre limité de modes de profils d'emploi.

On remarque qu'après élimination des spectres en doublon, ce sont les bases contenant uniquement les hautes fréquences ou les basses fréquences qui obtiennent les meilleures performances de classification. Ce résultat est cohérent puisque les bases finales obtenues avec ces méthodes sont moins réduites qu'avec les autres méthodes appliquées et ont pu donc conserver plus d'informations. En revanche, ces deux méthodes présentent des difficultés de généralisation lorsqu'on utilise le modèle sur d'autres données d'entrée. Cette technique de réduction sera ainsi écartée pour la suite de notre étude. Comme on se trouve dans le cas de signaux périodiques (signaux sinusoïdaux et signaux à impulsions), la TFD apparaît comme le meilleur compromis entre la précision et le taux d'erreur de classification. Pour une réduction plus précise des données, cette méthode peut être combinée avec les performances de l'ACP.

De ce fait, on peut conclure que les bases réduites trouvées, notamment avec la méthode de la SVD, sont pertinentes pour réduire les nouveaux profils d'emploi et prévoir leur défaillance plus précisément. Ces bases permettent en particulier d'alléger le modèle et d'avoir une phase d'apprentissage minimale. Ainsi, on a montré qu'avec d'autres profils d'emploi très différents de ceux rencontrés lors de la phase d'apprentissage, ils peuvent être exprimés dans les bases réduites et produire des performances similaires de classification des défauts. La méthodologie de réduction dimensionnelle est basée sur les résidus calculés à partir du comportement nominal du moteur. Par conséquent, la spécificité de la défaillance sera également détectée lorsque la réduction sera effectuée sur une base d'entrée contenant les profils d'emploi d'un autre moteur. Pour vérifier cela, les modèles physiques doivent être modifiés selon les paramètres du nouveau moteur.

#### 4. PREDICTION DE L'ÉVOLUTION DES DÉFAUTS A PARTIR DES VARIABLES EXPLICATIVES

La classification des données résiduelles effectuée à l'aide du modèle hybride permet de relier les résidus à une loi d'usure. En effet, le travail préliminaire [1] a permis d'associer chaque résidu aux paramètres d'usure appliqués au modèle physique dégradé. Les paramètres d'usure incluent notamment la pente du défaut infligé au moteur et le moment d'apparition du défaut. Quant à la loi d'usure, elle est déterminée selon l'amplitude et la fréquence des données d'entrée. Une caractérisation des résidus selon le type de défaut observé sur le système

peut, dans ce cas, être réalisée pour établir une corrélation entre les paramètres d'usure et les variables d'entrée. A terme, un lien sera établi entre l'évolution des variables suivies et l'évolution des défauts. Avec un suivi de l'évolution des variables, il sera possible de prédire l'évolution du défaut au cours du temps grâce à une régression.

L'objectif est de réaliser la prédiction de séries temporelles sur le long terme (évolution du paramètre d'usure) en utilisant également les valeurs des séries temporelles observées sur le court terme (évolution des quantités d'intérêt de sortie). Après plusieurs tests de performances de prédictions et, en tenant compte de notre durée totale de simulation, on choisit d'observer une fenêtre de 50 échantillons pour prédire le reste de l'allure de la pente du défaut. Une régression comprenant des couches de cellules LSTM (Long short-term memory) (figure 7) a ensuite été mise en place (étape 3 de la figure 1). L'atout de ce type de cellules dans les réseaux neuronaux est qu'il possède des connexions de rétroaction permettant de réguler le flux d'informations qu'il a en mémoire grâce à des systèmes qui peuvent s'apparenter à des « portes ».

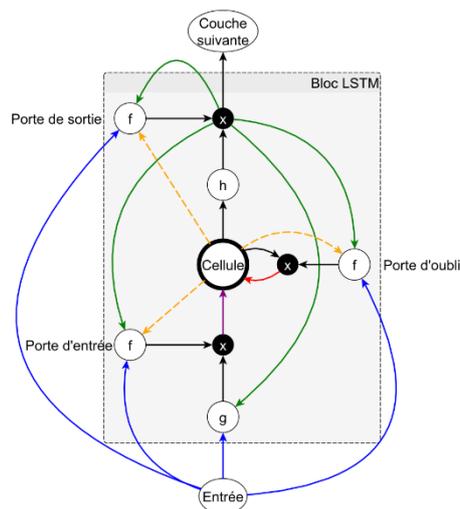


Figure 7 - Schéma d'un neurone LSTM [6]

Les données d'entraînement pour la régression LSTM englobent les données résiduelles obtenues en sortie du modèle mis en place dans le travail précédent ainsi que les paramètres injectés dans les lois d'usures utilisées dans la modélisation de l'usure du moteur, à savoir les instants d'apparition du défaut et la pente du défaut. La limite de ce modèle est qu'il est gourmand en données, même s'il modélise bien les processus non linéaires. Les résultats du modèle de régression sont présentés sur la figure 8.

On s'aperçoit que la régression parvient à retranscrire correctement l'évolution de la pente du défaut mais on vérifiera par la suite que la régression reste aussi performante dans le cas de motifs d'usure cycliques. En effet, il faudra s'assurer que la régression s'adapte lors d'une allure de défaut moins linéaire et évoluant plus lentement dans le temps. Il est prévu pour cela de

complexifier l'étude des profils d'emploi, tout comme l'étude des défauts.

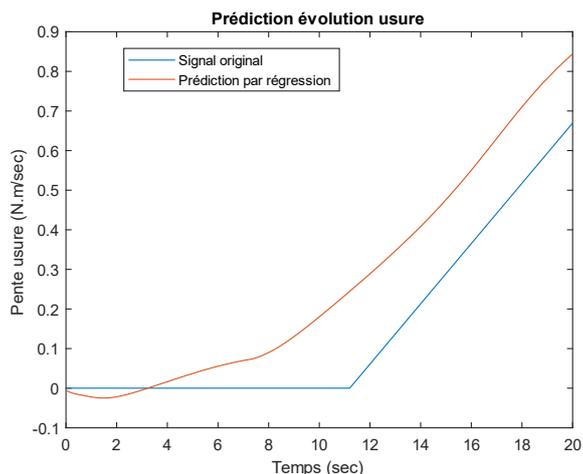


Figure 8 - Prédiction de l'évolution de l'usure

## 5. DISCUSSION & PERSPECTIVES

L'approche proposée basée sur la réduction dimensionnelle a montré que le modèle mis en place est capable d'obtenir des performances équivalentes en réduisant le nombre de données d'entrée. Cela signifie que lorsqu'un nouveau profil d'utilisation est appliqué sur le moteur, le modèle cherche à le décomposer en plusieurs profils qu'il aura déjà rencontré pendant sa période d'entraînement pour, en premier lieu, identifier et localiser le défaut. Ce travail s'est axé sur le développement des méthodes réalisées sur données synthétiques mais dans le but de l'appliquer sur des données réelles. La démarche a consisté à partir du développement d'une méthode validée numériquement pour progressivement l'appliquer à un banc d'essai moteur à axe linéaire remontant des données réelles.

En deuxième lieu, grâce à la corrélation établie entre l'évolution des grandeurs physiques relevées en sortie de modèle et l'évolution des défauts, il s'agira de montrer dans de futurs travaux que les lois d'usure et les modèles de régression prédisent l'usure sur le long terme. Dans un premier temps, la méthode devra vérifier que les modèles de régression détectent à quel stade du cycle d'usure se trouve le système. Dans un deuxième temps, la méthode sera testée sur les données réelles provenant du banc d'essai du moteur afin d'être validée.

Enfin, une limite de la démarche détaillée dans ce papier est que la répartition des fréquences des données d'entrée, mise en évidence par la TFD de chaque spectre, présente une faible amplitude. On peut alors se demander si les profils d'utilisation simulés ont une assez grande variabilité initialement, avant réduction des données. L'application de la méthode de réduction de dimensionnalité sur le banc d'essai permettra de la valider expérimentalement de manière rigoureuse.

## RÉFÉRENCES

- [1] Morgane, S., Emmanuelle, A., Pierre-André, R. & Frédéric, D. (2022) Performance of hybrid modeling on a failure process in industrial systems Performance de la modélisation hybride sur un processus de défaillance dans les systèmes industriels.
- [2] Ibrahim, Kaddouri, Youcef & Serah. (2019) Détection des défauts d'une machine tournante par l'analyse FFT. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf M'Sila.
- [3] Tanwar, S., Ramani, T., & Tyagi, S. (2018) Dimensionality reduction using PCA and SVD in big data: A comparative case study. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST, 220 LNICST, 116–125.
- [4] Kanth, K. V. F., Agrawal, D., & Singh, A. (1998) Dimensionality Reduction for Similarity Searching in Dynamic Databases.
- [5] Frusque, G., Jung, J., Borgnat, P., & Gonçalves, P. (2019). Réduction de dimension tensorielle parcimonieuse : Application au clustering de connectivité fonctionnelle. <https://hal.inria.fr/hal-02154888>
- [6] Sterner, B., "Theta series attached to level one quadratic forms and Siegel modular forms", Thèse (2018)
- [7] Condat, L. (2006) Méthodes d'approximation pour la reconstruction de signaux et le redimensionnement d'images. Interface homme-machine [cs.HC]. Institut National Polytechnique de Grenoble -INPG
- [8] Patel, N., Nease, J., Aumi, S., Ewaschuk, C., Luo, J., Mhaskar, P. (2020) Integrating Data-Driven Modeling with First-Principles Knowledge. Industrial and Engineering Chemistry Research (11), 5103–5113
- [9] Gupta, T.K., et al.: (2015) Dimensionality reduction techniques and its applications. J.Comput. Sci. Syst. Biol.8(3), 170
- [10] Suri, S., Bailis, P. (2019). DROP: A workload-aware optimizer for dimensionality reduction. Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data
- [11] Soleimani-Babakamali, M. H., Soleimani-Babakamali, R., Sarlo, R., Farghally, M. F.; Lourentzou, I. (2023). On the effectiveness of dimensionality reduction for unsupervised structural health monitoring anomaly detection. Mechanical Systems and Signal Processing
- [12] Hanachi, H., Yu, W., Kim, I. Y., Liu, J.; Mechefske, C. K. (2019). Hybrid data-driven physics-based model fusion framework for tool wear prediction. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (9–12), 2861–2872.
- [13] De Bézenac, E., Pajot, A.; Gallinari, P. (n.d.). Deep learning for physical processes: incorporating prior scientific knowledge
- [14] Bhutani, N., Rangaiah, G. P.; Ray, A. K. (2006). First-principles, data-based, and hybrid modeling and optimization of an industrial hydrocracking unit. Industrial and Engineering Chemistry Research
- [15] D. Ryckelynck, F. Chinesta, E. Cueto, A. Ammar. (2005) On the a priori Model Reduction: Overview and Recent Developments. Meshfree Methods for Partial Differential Equations II, 43, Lecture Notes in Computational Science and Engineering
- [16] J.-L. Blanchard, F. Abid, G. Chevallier. (2014) A New Approach for the Identification of Reduced Thermal Models, Institute of Electrical and Electronics Engineers, THERMINIC : 20th International Workshop, Thermal Investigations of ICs and Systems : proceedings, Greenwich, London, UK

# Développement d'un protocole de comparaison d'algorithmes d'apprentissage par renforcement pour la gestion optimale temps-réel de flux de puissance dans un micro-réseau électrique

R. Oulhaj <sup>a,\*</sup>, P. Garambois <sup>a</sup>, L. Roucoules <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Arts et Métiers Institut de Technologie, HESAM Université, LISPEN, 13617 Aix-en-Provence, France

\* e-mail : rima.oulhaj@ensam.eu

## 1. INTRODUCTION

Les micro-réseaux électriques ont permis l'intégration de sources énergétiques distribuées, ainsi que l'amélioration de l'autosuffisance énergétique et de la pénétration d'énergies renouvelables grâce à l'utilisation de systèmes de stockage et la possibilité de gestion et de prise de décision indépendantes. En effet, l'installation d'un micro-réseau électrique dans un territoire donné permet à celui-ci la gestion des producteurs et des stockeurs locaux de manière à maximiser les intérêts environnementaux (e.g., diminution de l'impact carbone), sociaux (e.g., équité énergétique) et économiques (e.g., coûts énergétiques) de ce territoire. Il s'agit donc d'assurer une gestion (i.e., un pilotage) des technologies du micro-réseau pouvant maximiser ces intérêts tout en garantissant un approvisionnement de qualité. L'utilisation d'algorithmes d'apprentissage-machine est un point focal dans les travaux de recherche sur cette problématique, notamment en optimisation temps-réel de flux de puissance, et l'un des défis importants soulignés par les auteurs de cet article a été la difficulté de comparaison des algorithmes utilisés dans lesdits travaux puisque l'on doit réimplémenter (recoder et donc déboguer) les modèles de micro-réseaux qui y sont inclus afin d'émuler leurs résultats. De plus, il est nécessaire d'interfacer ces modèles aux algorithmes spécifiques afin de prendre en compte la terminologie adaptée, e.g., pour des algorithmes d'apprentissage par renforcement (AR) il faut coder les processus de transition et de récompense (plus de détails sont présents dans les parties 3.1.1, 3.1.2 et 3.1.3). Les travaux existants sur la normalisation de modèles de micro-réseaux incluent le CIGRE Task Force

C6.04.02 et le CIGRE Working Group 14.02 [2, 3, 4] ainsi que le IEEE European LV microgrid benchmark network [5]. De plus, les systèmes de bus de IEEE peuvent être considérés comme une normalisation de réseaux réels (le bus IEEE-14 [6] représente une approximation du système électrique américain).

Dans cet article, nous tentons de développer un protocole d'évaluation et de comparaison ou « benchmark » afin de comparer des algorithmes d'AR appliqués au problème d'optimisation temps-réel de flux de puissance dans un micro-réseau électrique. Pour cela, et au vu du développement d'un outil informatique permettant à différents utilisateurs d'effectuer cette comparaison, nous avons comme perspective de proposer différentes configurations « intégrées » de micro-réseaux ainsi que des outils spécifiques à la simulation du processus de décision markovien lié au problème d'optimisation afin d'implémenter les algorithmes d'AR. Un schéma de cet outil est donné dans la figure 3.

## 2. FORMALISATION DU BENCHMARK

Au vu du développement de notre protocole de comparaison d'algorithmes d'AR pour la résolution du problème d'optimisation temps-réel de flux de puissance dans un micro-réseau électrique, il est important de définir les éléments suivants [1] :

### Objet d'étude

Notre objet d'étude, ou objet de comparaison, correspond aux algorithmes d'AR dont on étudie la performance dans la résolution du problème spécifique

d'optimisation temps-réel de flux de puissance dans un micro-réseau électrique, ce problème étant formalisé sous forme de processus décisionnel de Markov (section 3.1.1). On s'intéresse donc à comparer leur capacité à effectuer une tâche précise. Notons qu'il s'agit ici du problème temps-réel, ce qui signifie que durant la phase de test, les algorithmes ont le droit à un seul passage sur la période de simulation (un seul épisode) et que les données de consommation et de production renouvelable non contrôlable sont différentes de celles utilisées dans la phase d'apprentissage.

Tout algorithme est défini par une donnée d'entrée, une donnée de sortie et par l'ensemble d'instructions à exécuter et qui, pour des raisons de lisibilité, sont généralement formalisées sous forme d'un pseudo-code. Plusieurs classes d'algorithmes nécessitent en plus de ces éléments le choix d'« hyperparamètres » régissant le fonctionnement d'une ou plusieurs instructions. Dans le cas des algorithmes d'AR, les instructions varient selon la classe de l'algorithme : on parle d'algorithmes d'AR « off-line » ou « on-line » et « on-policy » ou « off-policy ». Les hyperparamètres comprennent notamment le nombre d'itérations d'apprentissage, la longueur des épisodes, le coefficient d'actualisation dans l'équation de Bellman, etc. Dans le cas des algorithmes d'AR « profonds » qui font usage de réseaux de neurones, les hyperparamètres comprennent également la configuration de ces réseaux (nombre et connexité des couches, fonctions d'activation, etc.).

### Caractéristiques de l'objet d'étude

On s'intéresse à mesurer et à comparer les caractéristiques d'aptitude à réaliser la tâche (récompense cumulée à l'issue de l'optimisation de flux), de coût de calcul en termes de temps et de taille de données nécessaires à l'apprentissage ainsi que de fiabilité. Shengren et al. [17] comparent des algorithmes d'AR pour le pilotage de micro-réseaux, mais ils s'intéressent uniquement à la performance en termes d'aptitude à réaliser la tâche (récompense cumulée).

### Mesures

Des métriques permettant la quantification des caractéristiques étudiées ont été choisies pour comparer les algorithmes d'AR appliqués à notre problème d'optimisation (section 3.2).

### Collections expérimentales

Il s'agit des configurations de micro-réseau (technologies et leurs paramètres) qui feront l'objet des simulations de flux de puissance et qui seront pilotées à l'aide des algorithmes d'AR que l'on souhaite comparer. Ces simulations reposent sur une modélisation que nous proposons. Un exemple est présent dans la section 3.3.1.

### Jeux de données

Les jeux de données consistent en des profils de demande et des données météorologiques régissant la génération d'énergie renouvelable non contrôlable (section 3.4).

## 3. PROTOCOL EXPERIMENTAL

### 3.1. Objet d'étude : qu'est-ce que l'apprentissage par renforcement

#### 3.1.1. Le processus de décision markovien

Dans notre problème de gestion temps-réel de flux de puissance on souhaite déterminer pour chaque pas de temps les flux de puissance optimaux, comme la puissance à charger/décharger de chaque stockeur, la puissance à générer par les producteurs pilotables, etc. Il s'agit de maximiser une fonction de récompense à l'issue de la période de simulation, plus ou moins longue, en choisissant à chaque pas de temps l'action adéquate. Ce choix ne se base pas uniquement sur la récompense immédiate mais bien sur celle cumulée tout au long de la période de simulation en question. Chaque action a un impact sur l'état interne du système (ex : les niveaux d'énergie des stockeurs). Nous pouvons traduire ce problème par un Processus de Décision Markovien (Markov Decision Process ou MDP).

Un MDP (figure 1) est un tuple  $(S, A, T, R, \gamma)$  où  $S$  est l'espace des états du système pouvant être discret ou continu (dans le cas des micro-réseaux électriques les états sont continus puisqu'il s'agit de quantités physiques comme l'état de charge des stockeurs). L'élément  $A$  correspond à l'espace des actions qui lui aussi peut être discret (l'agent choisit ses actions dans une liste discrète) ou continu. Le dernier cas correspond à la gestion de flux de puissance puisqu'une action est un choix de valeurs de ces différents flux.  $A$  et  $S$  sont donc des sous-ensembles de deux espaces euclidiens multi-dimensionnels:  $A \subset \mathbb{R}^{D_A}$  et  $S \subset \mathbb{R}^{D_S}$ ,  $D_A$  et  $D_S$  étant les dimensions des espaces  $A$  et  $S$  respectivement. La fonction de transition  $T(s, a, s')$  donne la probabilité de transition à l'état  $s'$  lorsque l'action  $a$  est choisie à l'état  $s$ . La fonction  $R(s, a, s')$  représente la récompense obtenue lorsqu'on arrive à l'état  $s'$  en choisissant l'action  $a$  à l'état  $s$ . Si  $T$  et/ou  $R$  ne sont pas déterministes alors le MDP est dit stochastique. C'est cette stochasticité des transitions et des récompenses qui appelle à l'utilisation d'algorithmes d'AR.

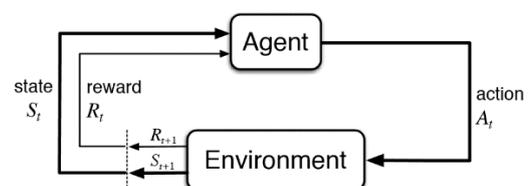


Figure 1 – Processus décisionnel markovien

### 3.1.2. Analogie avec le problème de gestion optimale de flux de puissances

Une analogie est possible entre le MDP tel que nous l'avons formalisé et le problème de gestion de flux de puissance dans un micro-réseau. Le système dont les états sont observés dans le MDP est ici les technologies que l'on souhaite piloter. Limitons-nous au cas où les seules technologies pilotables représentent une collection de stockeurs (micro-réseau de la figure 2).

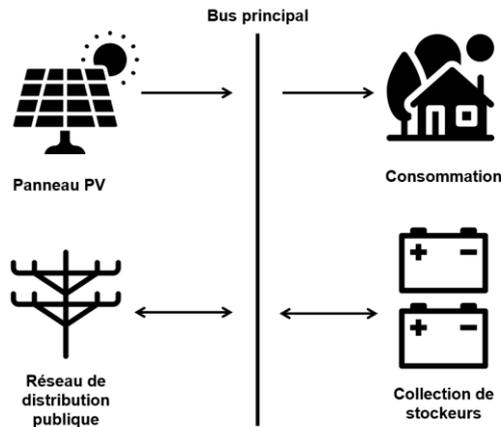


Figure 2 - Vanilla Microgrid

**Espace d'états du système** : un état du système, qui est dans notre exemple un micro-réseau comprenant une seule technologie pilotable (des stockeurs), est donné par les niveaux de charge de ceux-ci ( $\mathbf{W}_t^s$ )<sub>s∈S</sub> (d'autres éléments peuvent être considérés comme le niveau d'usure) ainsi que la génération renouvelable non pilotable  $\mathbf{RE}_t$  (panneau PV) et les flux tarifaires du réseau de distribution publique :  $\mathbf{GP}_t$  (prix d'achat) et  $\mathbf{FIT}_t$  (prix de rachat) ;

**Espace d'actions et transitions** : une action  $\mathbf{a}_t$  est une puissance de charge ou de décharge des stockeurs choisie à l'instant  $t$ . Cette action est contrainte par le niveau de charge des stockeurs, ce qui veut dire que l'intervalle des actions possibles à chaque instant  $t$  est contraint par l'état du système  $\mathbf{s}_t$ . L'espace des actions est donc fonction de l'état du système et l'on a  $\mathbf{A}(\mathbf{s}) = \{\mathbf{a} \in \mathbb{R} \mid \mathbf{T}(\mathbf{s}, \mathbf{a}) \in \mathbf{S}\}$ . La fonction de transition  $\mathbf{T}(\mathbf{s}, \mathbf{a})$  comprend une partie déterministe (charge/décharge) et une partie stochastique (flux tarifaires et génération renouvelable non contrôlable) ;

**Récompense** : La récompense peut être donnée par la somme de tous critères (souhaitables) d'intérêt dans notre cas d'étude qui peuvent être évalués après chaque transition. Elle est calculée pour chaque pas de temps, et donc pour chaque transition (voir fonctions-objectifs dans la section 3.3.2.). Comme la récompense est influencée par les flux tarifaires et la génération renouvelable non contrôlable, elle est également stochastique, d'où la nécessité d'algorithmes d'AR.

### 3.1.3. Les équations d'optimalité

Dans le cas où  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{S}$  sont continus, une politique de sélection d'actions  $\boldsymbol{\pi}(\mathbf{s})$  est une fonction de densité de probabilité sur  $\mathbf{S}$  qui correspond à la probabilité de sélection d'une action étant donné l'état courant.

Dans un MDP, un problème de contrôle correspond à trouver la politique de sélection d'actions  $\boldsymbol{\pi}$  qui maximise la récompense future actualisée. Les équations de Bellman nous donnent les fonctions de valeur (c'est-à-dire la récompense future actualisée) optimales à un état  $\mathbf{s}$  en choisissant une action  $\mathbf{a}$ :

$$Q^*(\mathbf{s}, \mathbf{a}) = \int_{\mathbf{S}} \mathbf{T}(\mathbf{s}, \mathbf{a}, \mathbf{s}') (\mathbf{R} + \gamma \max_{\mathbf{a}'} Q^*(\mathbf{s}', \mathbf{a}')) d\mathbf{s}'$$

Où  $\gamma$  est le coefficient d'actualisation. Intuitivement, la fonction  $Q^*: \mathbf{S} \times \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{R}$  donne la valeur obtenue si en étant en  $\mathbf{s}$  et en choisissant  $\mathbf{a}$ , on suit les actions optimales à tous les états futurs (d'où le terme  $\max_{\mathbf{a}'} Q^*(\mathbf{s}', \mathbf{a}')$ ). La seconde équation de Bellman concerne la fonction de valeur  $V^*: \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{R}$  qui calcule la récompense future actualisée optimale étant donné l'état actuel. Dans ce cas, l'équation d'optimalité s'écrit :

$$V^*(\mathbf{s}) = \max_{\mathbf{a}} \int_{\mathbf{S}'} \mathbf{T}(\mathbf{s}, \mathbf{a}, \mathbf{s}') (\mathbf{R}(\mathbf{s}, \mathbf{a}, \mathbf{s}') + \gamma V^*(\mathbf{s}')), d\mathbf{s}'$$

Des exemples d'algorithmes d'AR résolvant ce problème d'optimalité, notamment des algorithmes « profonds » utilisant des réseaux de neurones sont présentés dans [7, 8, 9, 10]

## 3.2. Mesures

Nous avons identifié un nombre de critères d'évaluation afin de comparer les algorithmes d'AR appliqués à notre problème d'optimisation temps-réel de flux de puissance. Le tableau 2 en donne le détail.

## 3.3. Collections expérimentales : les micro-réseaux électriques

### 3.3.1. Modélisation

On considère un modèle simplifié du micro-réseau électrique (figure 2) que l'on va nommer VanillaMicrogrid (VMG) et dans lequel le souci principal est celui d'assurer la gestion de flux de puissance entre les différents composants du micro-réseau. On ne se soucie donc pas de la régulation de fréquence et de voltage, puisqu'on considère que le micro-réseau est l'agrégation de composants qui injectent de la puissance dans le réseau et d'autres qui en puisent. Les générateurs renouvelables (panneaux PV) sont non-contrôlables puisque leur flux de puissance injecté dans le VMG dépend de l'irradiation solaire. La demande est modélisée par un niveau de puissance demandé à chaque pas de temps. Le stockage

est modélisé par un système à flux de puissance bidirectionnel, ce qui signifie que celui-ci peut à la fois injecter et puiser la puissance du réseau. Le problème revient à planifier la puissance à charger/décharger pour chacun des stockeurs et celle à puiser / réinjecter dans le réseau de distribution publique (le VMG fonctionne en mode connecté).

### 3.3.2. Problème d'optimisation de flux de puissance dans le VMG

Dans le problème d'optimisation des flux de puissance dans le VMG, les flux de puissance du stockage et du réseau de distribution publique sont les variables que l'on souhaite optimiser. Cependant, comme les flux de puissance dans le VMG sont toujours équilibrés, les flux de puissance du réseau de distribution peuvent être déduits de ceux du stockage. Les deux constitueraient donc des variables redondantes. Les seules variables retenues sont donc les flux de puissance du stockage.

#### Variables de décision :

Pour chaque système de stockage  $s$  et pour chaque pas de temps  $t$  soit  $x_t^s$  la puissance de charge/décharge de  $s$ . Les variables de décision sont  $(x_t^s)_{t \in [0, \dots, T], s \in S}$  où  $T$  est le nombre total de pas de temps et  $S$  l'ensemble de stockeurs dans le VMG. Puisque par choix de notre part on ne peut pas charger et décharger les stockeurs sur le même pas de temps,  $x_t^s$  est positive si le stockeur est en décharge et négative s'il est en charge.

#### Contraintes :

Les contraintes sont relatives à la capacité des stockeurs. Pour chaque stockeur  $s$  et pour chaque pas de temps  $t$  soit  $W_t^s$  l'énergie stockée dans  $s$ . Nous pouvons obtenir  $W_t^s$  à partir de  $W_{t-1}^s$  en appliquant l'équation :

$$W_t^s = W_{t-1}^s * (1 - \sigma_{SD}^s) + (P_{C,t}^s * \eta_C^s - \frac{P_{D,t}^s}{\eta_D^s}) * \Delta t$$

Où  $\sigma_{SD}^s$  est le coefficient d'autodécharge,  $P_{C,t}^s$  est la puissance de charge,  $P_{D,t}^s$  est la puissance de décharge,  $\eta_C^s$  est le coefficient d'efficacité de charge et  $\eta_D^s$  le coefficient d'efficacité de décharge. Par définition :

$$P_{D,t}^s = \max(0, x_t^s) \text{ et } P_{C,t}^s = -\min(0, x_t^s)$$

On définit l'état de charge par :

$$SOC_t^s = \frac{W_t^s}{W_{NC}^s}$$

Où  $W_{NC}^s$  est la capacité nominale du stockeur. La contrainte sur  $SOC_t^s$  est la suivante :

$$SOC_{\min}^s \leq SOC_t^s \leq SOC_{\max}^s$$

Les SOC minimum et maximum sont des caractéristiques du stockeur. La résolution du système composé de ces deux contraintes peut être traduite par une seule inéquation :  $x_t^{s,\min} \leq x_t^s \leq x_t^{s,\max} \forall s, t$

Cette inéquation est généralisable à toute configuration de micro-réseau. Si celui-ci inclut des générateurs contrôlables alors les variables de décision comprennent les puissances de génération de ceux-ci est des contraintes éventuelles s'ajoutent au problème.

#### Fonctions-objectifs :

Le choix des fonctions-objectifs dépend de la partie prenante qui souhaite piloter le micro-réseau et peut concerner les intérêts économiques, environnementaux ou sociaux. Considérons la fonction  $F_1$  qui sert à maximiser l'intégration de l'énergie renouvelable :

$$\max_{(x_t^s)_{t,s}} F_1((x_t^s)_{t,s}) = \max_{(x_t^s)_{t,s}} \sum_{t=0}^T RE_t - GL_t^+$$

Et la fonction  $F_2$  qui sert à minimiser le coût énergétique et à maximiser le gain de revente d'énergie :

$$\min_{(x_t^s)_{t,s}} F_2 = \min_{(x_t^s)_{t,s}} \sum_{t=0}^T GL_t^+ * GP_t + GL_t^- * FIT_t$$

Où  $GL_t^+$  est la puissance achetée au réseau de distribution publique (positive ou nulle) et  $GL_t^-$  est la puissance réinjectée dans celui-ci (négative ou nulle).  $GP_t$  est le prix d'achat d'énergie et  $FIT_t$  est le prix de rachat de celle-ci par le réseau de distribution publique. Comme par choix nous ne pouvons pas acheter et réinjecter au même pas de temps, on définit le flux de puissance du réseau de distribution  $GL_t$  par :

$$GL_t^+ = \max(0, GL_t) \text{ et } GL_t^- = -\min(0, GL_t)$$

Soit  $RE_t$  la somme de la génération renouvelable totale et  $PL_t$  la demande (power load) à l'instant  $t$ , on a :

$$GL_t = PL_t - RE_t - \sum_{s \in S} x_t^s$$

### 3.4. Jeux de données

Nous avons identifié des bases de données open-source comprenant des données de consommation ainsi que des données météorologiques. Le tableau 1 en donne le détail. Ces bases de données permettent de générer les profils de demande et de génération renouvelable non-contrôlable qui seront donnés en entrée de l'algorithme d'AR pour calculer les transitions stochastiques. La figure 4 permet de visualiser un exemple de ces profils.

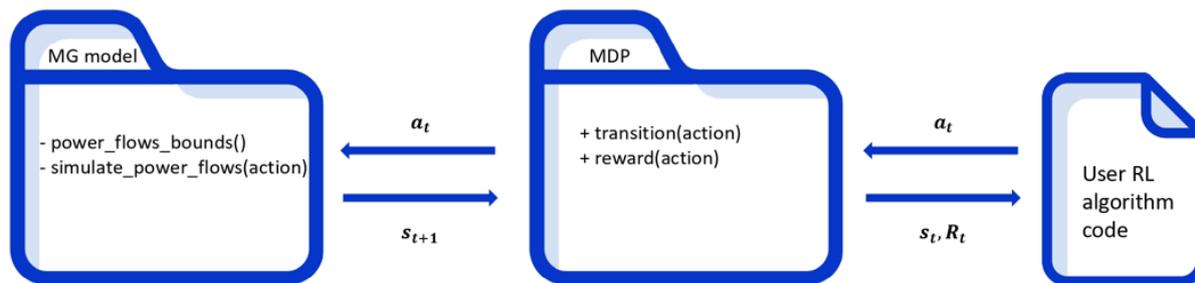


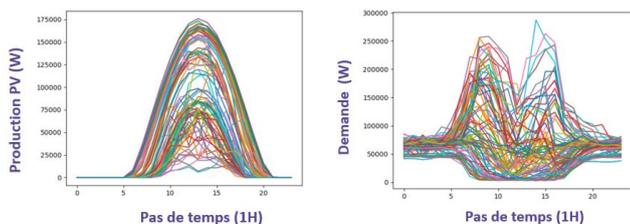
Figure 3 – Schéma de l'outil permettant l'interfaçage entre les algorithmes d'AR et le MDP

Type de données	Base de données	Granularité temporelle	Rayon géographique	Description
Consommation	ODRE [11]	15 min jusqu'à 1 an	Métropoles, régions	La plateforme Open Data Réseaux Energies (ODRE) donne accès à des données de consommation et de production (électrique et gaz) mises à disposition par des distributeurs français (GRTgaz, RTE, ...) ainsi qu'à des données de production renouvelable et de conditions météorologiques, etc. Ces données doivent être rééchelonnées pour s'adapter à un micro-réseau de plus petite taille
Rayonnement solaire (W/m <sup>2</sup> ) et vitesse du vent	ODRE	1 jour	Régions	-
Consommation	Catalogue Dido [12]	1 an	Villes, communes	Cette base de données fournit des données locales de consommation d'électricité, de gaz naturel et de chaleur et de froid. Cette base de données est fournie par le SDES [13]
Rayonnement solaire (W/m <sup>2</sup> )	Solcast [14]	30 min	Toute localisation (coordonnées de latitude et longitude)	Solcast est une API qui fournit des données réelles et prévisionnelles de rayonnement solaire pour toute coordonnée (en latitude et longitude). L'accès à titre gratuit est possible pour les chercheurs via un compte dédié

Tableau 1 – Bases de données open-source pour les données de consommation et les données météorologiques

Caractéristique	Métrique / mesure	Description
Aptitude à réaliser la tâche	Récompense cumulée (RC)	$\frac{1}{n} \sum_t^N r_t(a_t, s_t)$
	Moyenne interquartile de la récompense cumulée	Afin de résumer la performance de l'algorithme pour plusieurs configurations de micro-réseau et pour différents jeux de données, on utilise la moyenne interquartile pour éviter la sensibilité aux valeurs aberrantes tout en reflétant la distribution des performances (en termes de récompense cumulée)
Coût de calcul	Courbe de RC en fonction des itérations d'apprentissage	Il s'agit d'observer la vitesse à laquelle l'algorithme apprend la politique optimale
	Coût de l'ajustement des hyperparamètres et son effet sur la performance	Quelle taille de données est nécessaire pour l'optimisation des hyperparamètres (e.g., optimiser la configuration des réseaux de neurones utilisés dans les algorithmes d'AR profond) et à quelle point la performance est améliorée à l'issue de cette optimisation [15]
Fiabilité	SRT, LRT, DR, RR	Short-term Risk across Time, Long-term Risk across Time, Dispersion across Runs, Risk across Runs [16]. Ces métriques reflètent différents aspects de fiabilité comme la reproductibilité, la stabilité, la dispersion et le risque.

Tableau 2 – Mesures permettant la comparaison des algorithmes d'AR



**Figure 4 – Profils journaliers de génération PV (simulés à l'aide de profils d'irradiation obtenus sur Solcast) et de demande (ODRE) sur l'année 2021-2022**

## 4. CONCLUSION

Pour répondre au problème d'optimisation temps-réel de flux de puissance dans un micro-réseau électrique, on peut, en modélisant ce problème sous forme de MDP, le résoudre en utilisant des algorithmes d'apprentissage par renforcement (AR).

Dans cette étude, un protocole d'évaluation et de comparaison d'algorithmes d'AR appliqués à notre problème d'optimisation est proposé à la communauté scientifique. Ce protocole comprend des jeux de données ainsi que des métriques d'évaluation. Nous avons également comme perspective d'inclure des réseaux normalisés (e.g., réseaux CIGRE [2, 3, 4], IEEE [5, 6], ...) dans les configurations de micro-réseaux comprises dans nos collections expérimentales.

L'implémentation de ce protocole et sa mise à disposition de la communauté scientifique sous forme d'outil informatique nous paraît de la plus grande importance afin de créer une « éprouvette » commune permettant à d'autres chercheurs dans le domaine des micro-réseaux d'évaluer leurs algorithmes et de les comparer à l'état de l'art.

## Références

- [1] Benchmarks in Industrial Engineering Research, URL : <https://github.com/GIS-S-mart/Welcome>
- [2] K. Strunz and S. Barsali, "Cigre task force c6. 04.02: Developing benchmark models for integrating distributed energy resources" 01 2005
- [3] "Working group 14.02 (control in hvdc systems) of study committee 14. The cigre hvdc benchmark model — a new proposal with revised parameters," ELECTRA, pp. 60–66, 12 1994
- [4] K. Strunz and E. K. Brock, "Hybrid plant of renewable stochastic source and multi-level storage for emission free deterministic power generation," CIGRE/IEEE PES International Symposium on Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, Montreal, Canada, 10 2003.
- [5] M. S. Ayaz, R. Azizpanah-Abarghoee, and V. Terzija, "European lv microgrid benchmark network: Development and frequency response analysis," in 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), 2018, pp. 1–6.
- [6] IEEE 14-bus system - Illinois center for a smarter electric grid (ICSEG). [Online]. Available: <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-14-bus-system/>
- [7] Mohammed H. Alabdullah et Mohammad A. Abido. « Microgrid energy management using deep Q-network reinforcement learning ». In: Alexandria Engineering Journal 61.11 (1er nov. 2022), p. 9069-9078. issn: 1110-0168. doi : 10.1016/j.aej.2022.02.042. url : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822001284>
- [8] Volodymyr Mnih et al. « Human-level control through deep reinforcement learning ». In : Nature 518.7540 (fév. 2015). Number: 7540. Publisher : Nature Publishing Group, p. 529-533. issn : 1476-4687. doi : 10.1038/nature14236. url : <https://www.nature.com/articles/nature14236>
- [9] Mohammad Amin Soleimanzade, Amit Kumar et Mohtada Sadrzadeh. « Novel data driven energy management of a hybrid photovoltaic-reverse osmosis desalination system using deep reinforcement learning ». In : Applied Energy 317 (2022), p. 119184. issn : 0306-2619. doi : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119184>. url : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922005566>
- [10] Xiaohan Fang et al. « Multi-agent Deep Reinforcement Learning for Distributed Energy Management and Strategy Optimization of Microgrid Market ». In : Sustainable Cities and Society 74 (2021), p. 103163. issn : 2210-6707. doi : <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103163>. url : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721004443>
- [11] Open data réseaux Énergies (ODRE). [Online]. Available: <https://opendata.reseaux-energies.fr/>
- [12] Catalogue dido | données et études statistiques. [Online]. Available: [https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/catalogue?page=explore&type=dataset&agination=1&sortField=last\\_modified&sortOrder=desc](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/catalogue?page=explore&type=dataset&agination=1&sortField=last_modified&sortOrder=desc)
- [13] Service des données et études statistiques. [Online]. Available: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>
- [14] Solcast | solar api and solar weather forecasting tool. [Online]. Available: <https://solcast.com/>
- [15] M. Lucic, K. Kurach, M. Michalski, S. Gelly, and O. Bousquet, "Are gans created equal? a large-scale study," Advances in Neural Information Processing Systems 31., p. 698–707, 2018.
- [16] S. C. Y. Chan, S. Fishman, J. Canny, Korattikara Anoop, and G. Sergio, "Measuring the reliability of reinforcement learning algorithms."
- [17] Hou Shengren, Edgar Mauricio Salazar, Pedro P. Vergara, Peter Palensky, "Performance Comparison of Deep RL Algorithms for Energy Systems Optimal Scheduling". Doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.00728>

# Nouvelle méthodologie *in situ* pour la caractérisation des erreurs géométriques d'axe de rotation sur une machine-outil multi-axes

D. Maldonado<sup>a\*</sup>, F. Viprey<sup>a</sup>, S. Lavernhe<sup>b</sup>, G. Poulachon<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Arts et Métiers Science et Technologie, LABOMAP, UBFC, HESAM Université, F-71250, Cluny, France

<sup>b</sup> Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190 Gif-sur-Yvette, France.

\* e-mail : daniel.maldonado\_pimiento@ensam.eu

## 1. INTRODUCTION

La fabrication de pièces de haute exactitude représente un besoin et un défi dans l'industrie, des machines-outils sont utilisées à cet effet, néanmoins, celles-ci ont leurs propres défauts. L'erreur volumétrique est définie selon l'ISO 230-1 :2012 [1] comme la déviation relative entre la positionnement réel outil/pièce et le positionnement nominal. Les sources de ces déviations peuvent être diverses, mais la plus grande contribution est due aux erreurs quasi-statiques [2]. Parmi celles-ci la température a un impact important [3-4]. Cependant, la plupart des erreurs sont dues à des défauts géométriques [5]. Dans le cas des axes de rotation, ces défauts géométriques sont au nombre de 6 : deux erreurs de positionnement radial, deux erreurs d'inclinaison, une erreur de positionnement axial et une erreur de positionnement angulaire [6].

L'identification de ces erreurs peut se faire à l'aide d'outils et de procédures spécifiques. Les étalons matériels tels que les sphères [7] ou les barres à boules/à trous unidimensionnels et bidimensionnels [8], sont courants pour l'identification des axes de translation. Cependant, la procédure de mesure pour les axes de rotation est plus complexe et nécessite une certaine compacité. Il y a donc relativement peu de procédure à ce sujet. L'utilisation d'étalon matériels tels que des sphères est courante, c'est le cas de la méthodologie proposée par [9-10] pour identifier l'erreur radiale ou l'erreur axiale, en fonction de la disposition des capteurs. L'utilisation de cylindres est souvent appliquée lorsque la caractérisation des erreurs d'inclinaison ou radiales est requise [11]. Une autre approche a été proposée par [12] qui vise à obtenir une identification complète des six erreurs d'un axe rotatif. Ce système appelé Dual Optical Path Measurement Method (DOPMM) se compose d'une platine rotative

motorisée et d'un instrument laser Doppler. Il s'agit d'une méthodologie techniquement complexe à mettre en place dans un environnement d'atelier.

Malheureusement, la plupart de ces méthodes sont incapables d'identifier les six erreurs d'un axe rotatif ou sont trop complexes techniquement et mathématiquement.

En raison de l'utilisation d'étalons matériels pour effectuer la mesure, des défauts inhérents à la méthodologie (i.e. circularité ou une mauvaise orientation) font partie des données obtenues et peuvent être interprétés incorrectement comme des erreurs géométriques de machine. Des méthodologies ont été proposées pour différencier les erreurs d'étalon des erreurs de machine. Evans, dans [13] présente une synthèse des trois types d'approches habituellement utilisées pour résoudre cette problématique : la méthode de retournement simple, la méthode de multi-retournement et la méthode multi-capteurs.

Les méthodes de retournement sont des techniques qui ont pour objectif de changer le signe d'une composante de l'erreur. Deux mesures sont ainsi effectuées, avec impérativement un changement de la configuration du montage entre ces deux mesures. Il est alors nécessaire de manipuler mécaniquement l'étalon et le capteur, en les faisant tourner de 180°. En raison de sa simplicité mathématique et de sa séparation théoriquement parfaite, cette approche est souvent considérée comme meilleure que les autres méthodes. Cependant, elle est techniquement compliquée car il est difficile d'assurer un positionnement parfait du capteur et de l'étalon. Une manipulation mécanique entre les deux mesures peut introduire des erreurs dans le résultat de mesure. La méthode multi-retournement, contrairement à la

précédente, ne requiert que la manipulation de l'étalon. Celui-ci est indexé par un certain nombre de rotations équidistantes, jusqu'à avoir effectué une révolution complète; tandis que le capteur reste immobile. A première vue, cette méthode semble plus simple que la méthode de retournement simple, mais son efficacité est fonction du nombre d'indexations effectuées. Autrement dit, un plus grand nombre d'indexations génère une meilleure qualité du résultat de mesure. Par conséquent, pour obtenir des résultats suffisamment justes, il faut effectuer un grand nombre d'indexations, ce qui rend la méthodologie chronophage et requiert beaucoup de manipulations mécaniques de l'étalon [14].

La méthode multi-capteurs est basée quant à elle, sur l'utilisation de mesures simultanées opérées par différents capteurs (généralement trois). Cette méthode nécessite de manipulation mécanique ni des capteurs ni de l'étalon. Toutefois, ils doivent être finement positionnés afin d'assurer une bonne qualité de la séparation des erreurs. Cependant, comme Whitehouse l'a décrit dans [15], les méthodes multi-retournement et multi-capteurs présentent un problème critique: la suppression de certains harmoniques. En effet, ces méthodologies sont fondamentalement basées sur des transformées de Fourier. Par conséquent, le choix du nombre d'indexations et la distribution angulaire des capteurs respectivement pour la méthode multi-retournement et multi-capteurs devient essentielle pour une séparation correcte des erreurs. Ceci étant dû à la relation entre les indexations ou la distribution angulaire et la suppression des harmoniques de ladite fonction de Fourier.

De ce constat bibliographique, cet article décrit une méthodologie de mesure de géométrie d'axe de rotation de machine-outil dans la section 2. Dans la section 3, les méthodologies conventionnelles multi-capteurs et multi-retournement sont analysées mathématiquement. Cette analyse justifie la proposition architecturale du système de mesure présenté dans la section 2. Une optimisation des méthodes de séparation des erreurs est effectuée en section **Erreur! Source du renvoi introuvable.** pour assurer la complétude de la caractérisation. Finalement, des conclusions et des perspectives de ce développement sont présentées.

## 2. METHODOLOGIE DE MESURE

La méthodologie de mesure repose sur une panoplie de capteurs ciblant une géométrie de référence (ici un cylindre). La disposition et le nombre de capteurs sont déterminés en fonction des erreurs à identifier. Par exemple, un seul capteur orienté perpendiculairement à l'axe de rotation du cylindre de référence (étalon), ne permet que d'obtenir une variation du déplacement capteur/cylindre dans le plan  $(\vec{x}, \vec{y})$  (cf. Figure 1). La direction de mesure est donc insensible à des variations dans la direction  $\vec{z}$ . Par conséquent, des capteurs positionnés parallèlement au cylindre sont utilisés à cette fin. Les données obtenues par ce capteur présentent une interdépendance des effets à la fois d'erreur radiale et

d'erreur d'inclinaison, comme le montre la Figure 1. Cependant, il est impossible de connaître la contribution de chacune de ces erreurs avec un seul capteur. L'utilisation de deux capteurs radiaux et séparés par une distance  $d$ , fournit deux résultats de mesure simultanés  $R_1$  et  $R_2$ . Deux variations identiques de  $R_1$  et  $R_2$  seraient interprétées comme une erreur radiale. Des mesures différentes entre les capteurs indiqueraient la présence d'une erreur d'inclinaison. Puisque  $d$  est minutieusement identifié par étalonnage, l'inclinaison peut être calculée en utilisant la méthode de mesure différentielle [1]. Cette distribution est également utilisée pour les capteurs orientés parallèlement à l'axe de rotation du cylindre de référence, afin de différencier l'erreur axiale de l'erreur d'inclinaison. Le positionnement stratégique des capteurs permet l'identification des erreurs radiales, d'inclinaison et axiales d'un axe de rotation de machine-outil.

## 3. METHODES DE SEPARATION DES ERREURS

La méthodologie proposée, basée sur la technique multi-capteurs et multi-retournement ne nécessite pas l'utilisation de géométrie de référence de haute qualité ni même de son étalonnage préalable. La mise en œuvre de deux techniques de séparation des erreurs fournit les défauts de circularité et les déviations dues à une mauvaise orientation de l'étalon. La méthodologie permet une séparation plus complète des erreurs en termes d'harmoniques identifiés tout en réduisant au minimum les manipulations mécaniques du système. Le principe technique et mathématique des méthodes de séparation d'erreurs est présenté ci-après.

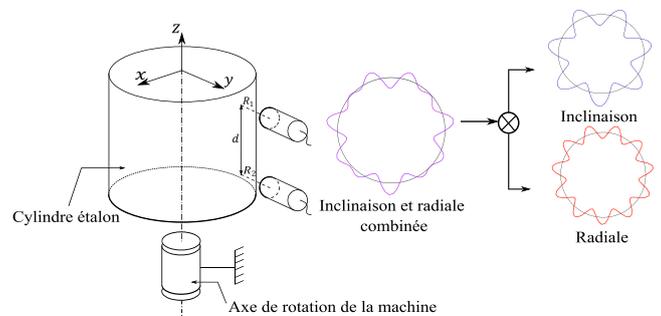


Figure 1 - Mesures potentielles en fonction de l'emplacement et de l'orientation des capteurs

### 3.1. Méthode multi-capteurs

La méthode multi-capteurs se compose de trois capteurs. Ils sont orientés à  $0^\circ$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  degrés, tous dans la même section transversale de l'étalon, comme le montre la

Figure 2. Les trois mesures simultanées sont représentées mathématiquement comme la somme de l'erreur de circularité de l'étalon  $r(\theta)$  plus les composantes  $x(\theta)$  et  $y(\theta)$  de l'erreur d'axe de rotation dans le repère machine. Le terme  $S(\theta)$  est l'effet des erreurs géométriques de l'axe de rotation étudié dans la direction de mesure du capteur  $m$ . A noter, que l'erreur

$r(\theta)$  inclut la circularité intrinsèque de l'étalon ainsi que de potentielles erreur de positionnement de ce dernier.

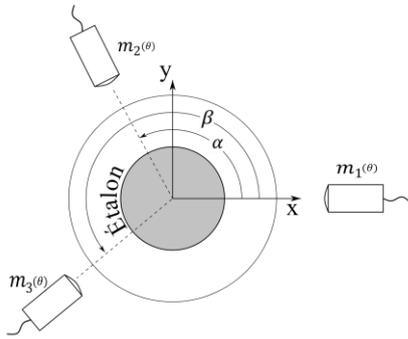


Figure 2 - Schéma de la méthode multi-capteurs

$$\begin{cases} m_1(\theta) = r(\theta) + x(\theta) \\ m_2(\theta) = r(\theta - \alpha) + x(\theta) \cos(\alpha) + y(\theta) \sin(\alpha) \\ m_3(\theta) = r(\theta - \beta) + x(\theta) \cos(\beta) + y(\theta) \sin(\beta) \end{cases} \quad (1)$$

Il est difficile d'extraire le défaut de forme de l'étalon ou l'erreur géométrique intrinsèque de l'axe à partir des trois équations initiales (Equation (1)). Pour résoudre ce système, une nouvelle équation (2) est définie comme étant la combinaison linéaire des trois résultats de mesure obtenus par les 3 capteurs dans leur repère respectifs  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ . Les constantes  $a$ , et  $b$  sont déterminées afin de pouvoir annuler les contributions des erreurs machine (i.e.  $x(\theta)$  et  $y(\theta)$ ).

$$M(\theta) = m_1(\theta) + a m_2(\theta) + b m_3(\theta) \quad (2)$$

En remplaçant les équations (1) dans (2), il vient :

$$\begin{aligned} M(\theta) = & r(\theta) + x(\theta) \\ & + a [r(\theta - \alpha) + x(\theta) \cos(\alpha) \\ & + y(\theta) \sin(\alpha)] \\ & + b [r(\theta - \beta) + x(\theta) \cos(\beta) \\ & + y(\theta) \sin(\beta)] \end{aligned} \quad (3)$$

L'équation peut être alors s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} M(\theta) = & r(\theta) + a r(\theta - \alpha) + b r(\theta - \beta) \\ & + x(\theta)[1 + a \cos(\alpha) + b \cos(\beta)] \\ & + y(\theta)[a \sin(\alpha) + b \sin(\beta)] \end{aligned} \quad (4)$$

Afin de supprimer les erreurs de la machine  $a$ , et  $b$  doivent être calculées à partir du système suivant :

$$\begin{cases} 1 + a \cos(\alpha) + b \cos(\beta) = 0 \\ a \sin(\alpha) + b \sin(\beta) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Après résolution :

$$\begin{cases} a = \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha - \beta)} \\ b = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta - \alpha)} \end{cases} \quad (6)$$

Enfin, l'expression de  $M(\theta)$  peut s'écrire :

$$M(\theta) = r(\theta) + a r(\theta - \alpha) + b r(\theta - \beta) \quad (7)$$

En utilisant la transformée de Fourier,  $M(\theta)$  et  $r(\theta)$  peuvent être exprimés comme une somme de cosinus et sinus :

$$\begin{cases} M(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\theta) + B_k \sin(k\theta) \\ r(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta) \end{cases} \quad (8)$$

En remplaçant l'équation (8) dans (7) il vient :

$$\begin{aligned} M(\theta) = & \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \varphi_k - b_k \delta_k) \cos(k\theta) + \\ & (a_k \delta_k + b_k \varphi_k) \sin(k\theta) \end{aligned} \quad (9)$$

où

$$\begin{cases} \delta_k = b \sin(k\beta) + a \sin(k\alpha) \\ \varphi_k = 1 + a \cos(k\alpha) + b \cos(k\beta) \end{cases} \quad (10)$$

Par la suite, les équations (10) et (8) permettent la formulation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_k & -\delta_k \\ \delta_k & \varphi_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_k \\ b_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_k \\ B_k \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Comme les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  sont connues, il est possible de calculer  $a$  et  $b$  (Équation (6)). Ensuite,  $\varphi_k$  et  $\delta_k$  peuvent être calculés par l'équation (10). Puis, les valeurs de  $A_k$  et  $B_k$  sont données par l'équation (8). Ainsi, il est désormais possible d'obtenir  $S_i(\theta)$  (Equation (12)) comme étant l'effet des erreurs géométriques de l'axe de rotation étudié dans la direction de mesure du capteur  $m_i$ .

$$\begin{cases} S_1(\theta) = m_1(\theta) - r(\theta) \\ S_2(\theta) = m_2(\theta) - r(\theta - \alpha) \\ S_3(\theta) = m_3(\theta) - r(\theta - \beta) \end{cases} \quad (12)$$

Si la matrice finale est analysée plus en détail, il est possible de remarquer qu'une sélection incorrecte de  $\alpha$  et  $\beta$  peut générer des valeurs nulles du déterminant (suppression d'harmoniques). Ou alors, cela peut conduire à des valeurs très faibles de  $\varphi_k$  et  $\delta_k$ , conduisant à un mauvais conditionnement de la matrice et finalement à une séparation des erreurs de moindre qualité. Par la suite, ce problème de suppression des harmoniques inhérent à la méthodologie, sera résolu par la technique de séparation des erreurs par multi-retournement.

### 3.2 Méthode de multi-retournement

Dans la méthode de multi-retournement, l'étalon est indexé par  $N$  incréments angulaires  $\gamma$  (sous-multiple de  $360^\circ$ ), tandis que le capteur reste immobile. Par conséquent, chaque mesure sera composée de l'effet des erreurs géométriques de l'axe  $S(\theta)$  dans la direction de mesure, plus l'erreur de circularité  $r(\theta)$ . L'erreur de circularité sera déphasée en fonction de l'orientation  $n \cdot \gamma$  où  $n \in \llbracket 1; N \rrbracket$ . Ceci peut être représenté mathématiquement comme indiqué dans l'équation (13).

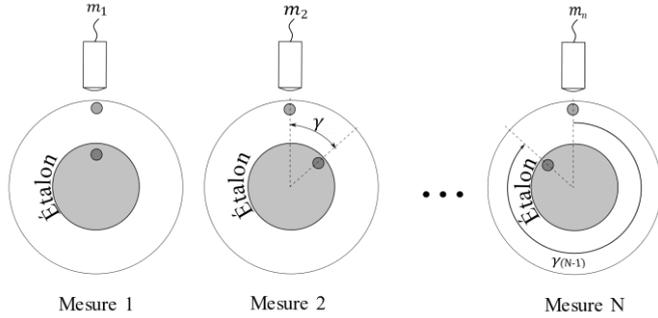


Figure 3 - Schéma de la méthode de multi-retournement

$$m_n(\theta) = S(\theta) + r(\theta + \gamma(n - 1)) \quad n \in \llbracket 1; N \rrbracket \quad (13)$$

En supposant que  $S$  et  $r$  sont invariants durant le processus, en additionnant chacune des  $N$  mesures effectuées, l'équation suivante est obtenue :

$$S(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_n - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} r(\theta + k\gamma) \quad (14)$$

Comme dans la technique multi-capteur, l'erreur de forme de l'étalon peut être exprimée comme suit :

$$r(\theta) = \sum_{p=1}^{\infty} A_p \cos(p\theta) + B_p \sin(p\theta) \quad (15)$$

En substituant ceci dans l'équation (14), il en est déduit :

$$S(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_n - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{p=1}^{\infty} A_p \cos(p(\theta + k\gamma)) + B_p \sin(p(\theta + k\gamma)) \quad (16)$$

La plupart des termes de la double sommation deviennent égaux à zéro [14], de sorte que l'erreur de l'axe peut être approximée comme indiqué dans l'équation (17). Cependant, en fonction de la valeur de  $\gamma$  choisie, certains termes de la double sommation ne sont pas nuls. Par conséquent, l'hypothèse de l'équation (17) est invalide. Ces termes non nuls correspondent à des multiples du nombre de mesures  $N$ . Cela montre que les harmoniques multiples de  $N$  ne seront pas correctement identifiées.

$$S(\theta) \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_n \quad (17)$$

### 4. SYSTÈME DE MESURE

Le système de mesure est composé de plusieurs capteurs capacitifs qui sont assemblés sur une structure nommée support de capteurs comme le montre la Figure 4b. Les capteurs capacitifs sont avantageux pour un système de mesure *in situ* en environnement machine car leur installation n'est pas volumineuse et leur étalonnage est plus facile à réaliser par rapport aux autres types de capteurs. Ils ont une très bonne résolution et stabilité. D'autre part, comme ce sont des capteurs sans contact, aucune perturbation inhérentes au contact ne se produira. Ces capteurs sont orientés radialement et axialement vers un cylindre qui est monté sur un système mécanique Figure 4a. La fonction de ce système est d'assurer l'alignement correct du cylindre avec l'axe de rotation machine étudié. Dans cette section, la structure support des capteurs et le système d'alignement seront présentés.

#### 4.1. Système d'alignement

Le système d'alignement permet le déplacement dans les directions  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$ , afin de compenser le désalignement entre l'axe du cylindre et l'axe de rotation qui sera caractérisé comme indiqué sur la Figure 4a. Même si la technique de séparation des erreurs identifie ce désalignement, une valeur élevée peut générer des mouvements radiaux qui dépassent l'intervalle de mesure des capteurs (quelques dizaines de microns). De plus, la compensation logicielle pourrait ne pas être optimale. Le système n'est pas équipé d'un mécanisme permettant de régler l'inclinaison du cylindre. Cependant, après caractérisation, l'inclinaison n'est pas assez importante pour dépasser la plage de mesure des capteurs, elle peut donc être identifiée avec la séparation d'erreurs. L'utilisation de tables croisées de type « tilt » pourraient introduire des erreurs indésirables dans l'assemblage, ainsi qu'augmenter l'encombrement du système et compliquer sa mise en place sur la machine.

Ce système d'alignement dispose également d'un plateau diviseur. Ce dernier permet de découpler la rotation du cylindre de celle de l'axe étudié sur la machine en vue de générer l'indexation d'angle  $\gamma$  requise dans la méthode de multi-retournement. Ce plateau est également aligné avec l'axe de rotation de la machine afin d'éviter un mouvement incorrect lors de l'indexation.

#### 4.2. Structure de support des capteurs

Il s'agit d'une structure porteuse des capteurs entourant complètement la surface du cylindre. Ce corps fixé sur la broche de la machine assure le positionnement correct des capteurs. Ceux-ci sont organisés en trois groupes. Deux groupes de capteurs disposés radialement sur deux sections transversales espacées d'une distance connue  $d$ . Le troisième groupe de capteurs est disposé

axialement, orienté vers le sommet du cylindre étalon comme le montre la Figure 4. La structure du support capteur a deux configurations possibles :

- Une première pour les méthodes de séparation d'erreurs (i.e. multi-retournement et multi-capteur)
- Une seconde pour assurer l'identification des erreurs géométriques spécifiée dans l'ISO 230-1 :2012 [1] et ISO 230-7 :2015 [6] ainsi que la redondance de la mesure.

La première configuration consiste à placer les capteurs radiaux précédents non plus tous les  $90^\circ$  mais avec la répartition suivante :  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  ( $\alpha$  selon la Figure 2) et  $230^\circ$  ( $\beta$  selon la Figure 2). Cette nouvelle répartition a été calculée et reconnue comme optimale pour la séparation des erreurs au moyen de la technique multi-capteurs (cf. Section **Erreur! Source du renvoi introuvable.**).

La seconde configuration est destinée à mesurer les erreurs géométriques (seconde configuration susmentionnée). Les 4 capteurs radiaux dans une section sont equi-orientés à  $90^\circ$  (Figure 4b). Avec seulement deux capteurs orientés à  $0^\circ$ , il est possible d'identifier l'erreur d'inclinaison dans le plan  $(\vec{y}, \vec{z})$ . Avec une paire de capteurs positionnés à  $90^\circ$ , il est possible de mesurer l'inclinaison dans le plan  $(\vec{x}, \vec{z})$ . Les autres paires de capteurs à  $180^\circ$  et  $270^\circ$  qui sont en vis-à-vis des paires à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  permettent une redondance de la mesure et ainsi réduire l'incertitude de mesure selon le GUM.

Le troisième groupe de capteurs disposés axialement (Figure 4(b)) permet quant à lui d'identifier les erreurs axiales et d'inclinaison (cf. Section 2).

La mise et maintien en position des capteurs est assurée par une douille filetée à pas fin (0,5 mm). Cette douille est elle-même vissée dans la structure de support. La vis à pas fin permet de régler et ajuster la position radiale du capteur vis-à-vis du cylindre et assurer le centrage sur l'intervalle de mesure du capteur. Les capteurs utilisés (Fogale MCC10) ont un intervalle de mesure et une résolution réglable par un gain. L'étendue de mesure varie entre  $58 \mu\text{m}$  et  $1900 \mu\text{m}$ .

Pour réduire le bruit de mesure et assurer le comportement d'un condensateur (capteur capacitif + cylindre étalon), il est impératif d'avoir une masse commune entre les capteurs et le cylindre de référence. Pour cette raison, la structure permet une mise à la masse du cylindre par contact via un balai.

## 5. OPTIMISATION DES METHODES DE SEPARATION DES ERREURS

La sélection des angles des capteurs dans la première configuration (i.e.  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $230^\circ$ ) a été faite sur la base de la suppression des harmoniques montrée par les équations de la section 3. L'objectif est de minimiser le nombre d'harmoniques supprimés et que les harmoniques toutefois supprimés soient de valeur élevée. Car ces ondulations ne sont pas courantes et représentatives d'évolution des erreurs géométriques en

fonction de l'angle pris par l'axe de rotation de la machine-outil. De plus, ces harmoniques pourraient même représenter le bruit de mesure.

La répartition angulaire des trois capteurs ( $0^\circ$ ,  $\alpha=90^\circ$ ,  $\beta=230^\circ$ ) est la même sur les deux sections transversales espacées d'une distance connue  $d$ . Le premier capteur a été placé à  $0^\circ$ , le deuxième à  $90^\circ$  car ces emplacements sont ceux utilisés dans la deuxième configuration. Quant à la position du troisième capteur, celle-ci a été choisie parmi les positions possibles entre  $90^\circ$  et  $360^\circ$  (par incrément de  $10^\circ$ ) comme le montre la Figure 5. Il est clairement observable que certaines dispositions du troisième capteur ne sont pas souhaitables comme le positionnement à  $270^\circ$ , par exemple. En effet, la Figure 5 montre que pour  $270^\circ$ , tous les harmoniques sont supprimés. Pour un emplacement à  $260^\circ$  ou  $280^\circ$ , un seul harmonique n'est pas identifié. Cependant, il est techniquement complexe de placer un capteur près d'un autre (déjà positionné à  $270^\circ$ ). De ce fait, la position  $\beta=230^\circ$  a été choisie. Cette décision entraînera la suppression des harmoniques 1, 4. Ces harmoniques seront identifiables par la méthode multi-retournement, comme mentionné ci-après. Ce choix de  $\beta$  assure une moyenne élevée du déterminant de la matrice à l'Equation 11 par rapport aux autres configurations. Cela conduit donc à une meilleure séparation des erreurs.

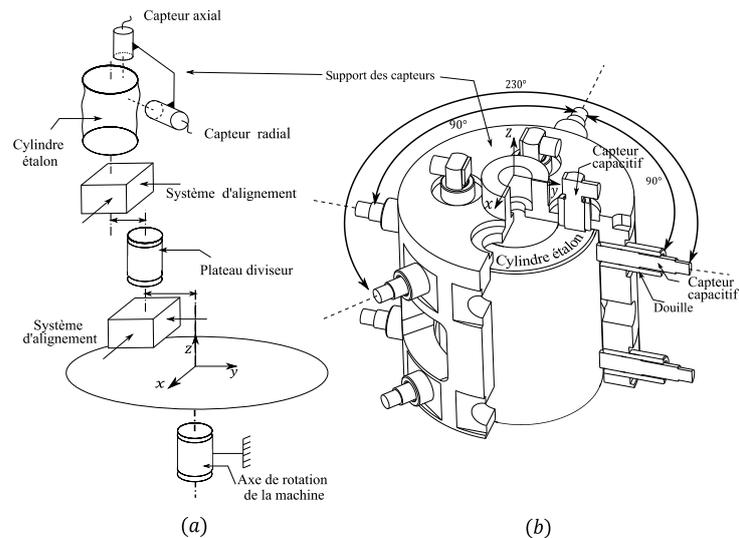


Figure 4 - Architecture du système de mesure (a), emplacements et orientations des capteurs dans le support de capteur (b)

En utilisant la méthode multi-retournement et en sélectionnant correctement l'angle d'indexation  $\gamma$ , il est possible d'obtenir des harmoniques supprimées différentes de ceux de la méthode multi-capteurs. En effet, en choisissant un angle d'indexation  $\gamma$  égale à  $36^\circ$ ; autrement-dit  $N = 10$  indexations, les harmoniques 10 et 20 ne seront pas identifiées. Ceux-ci sont bien différents de ceux de la méthode multi-capteurs (i.e. harmoniques n° 1 et 4). Par conséquent, conjointement les deux méthodes permettent l'identification des 20 premiers harmoniques sans suppressions de certains.

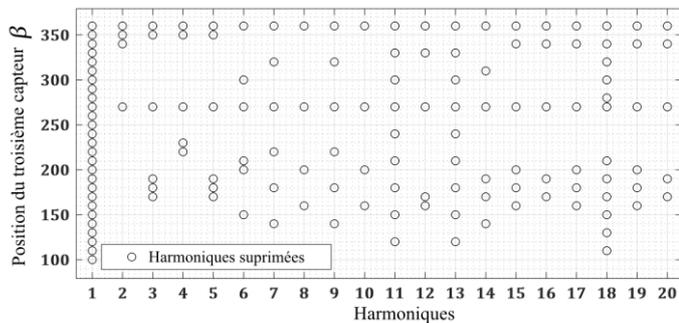


Figure 5 - Harmoniques supprimées à différentes positions du troisième capteur avec le deuxième capteur à 90°.

## 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article présente une nouvelle méthodologie pour la mesure *in situ* des erreurs géométriques d'un axe rotation de machine-outil. Cette méthodologie repose sur une disposition stratégique de capteurs. La séparation des erreurs de la machine et du système de mesure est envisagée. Cette séparation des erreurs implique une optimisation mutuelle des méthodes de multi-retournement et multi-capteur classiquement utilisés en métrologie de surfaces cylindriques ou sphériques. Cette optimisation vise à assurer la complétude de l'identification des harmoniques tout en minimisant les manipulations mécaniques du système. Cette méthodologie est intéressante car elle ne nécessite pas un étalon de référence de haute qualité et certifié, ni un environnement métrologique, puisque la disposition des capteurs génère une redondance permettant de comparer et de corroborer les données obtenues par différents capteurs. Le système de mesure nouvellement fabriqué permettra de confronter la démarche scientifique par une campagne expérimentale et mener à bien l'identification des erreurs géométriques des axes de rotation. Pour ce faire, les capteurs ont été étalonnés pour caractériser leur comportement sur la surface cylindrique. Cette campagne expérimentale sera menée sur la machine-outil 5-axes HSM600U équipée d'une CN iTNC530. Les données récupérées de ces dispositifs permettront une caractérisation de l'axe rotatif, l'identification des erreurs géométriques, ainsi qu'un bilan et la propagation des incertitudes.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) -JCJC [INTEGRATION](#) et la Région Bourgogne-Franche-Comté (RBFC).

## RÉFÉRENCES

- [1] NF ISO 230-1, « Test code for machine tool - Part 1 : Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions. », 2012.
- [2] R. Ramesh, M. A. Mannan, et A. N. Poo, « Error compensation in machine tools — a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors », *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, n° 9, p. 1235-1256, juill. 2000, doi: 10.1016/S0890-6955(00)00009-2.
- [3] J. Bryan, « International Status of Thermal Error Research (1990) », *CIRP Ann.*, vol. 39, n° 2, p. 645-656, 1990, doi: 10.1016/S0007-8506(07)63001-7.
- [4] M. Rahman, « Modeling and measurement of multi-axis machine tools to improve positioning accuracy in a software way », p. 126.
- [5] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, et F. Delbressine, « Geometric error measurement and compensation of machines—an update », *CIRP Ann.*, vol. 57, n° 2, p. 660-675, 2008.
- [6] NF ISO 230-7, « Test code for machine tool - Part 7 : Geometric accuracy of axes of rotation », 2015.
- [7] Y. Masashi, N. Hamabata, et Y. Ihara, « Evaluation of Linear Axis Motion Error of Machine Tools Using an R-test Device », *Procedia CIRP*, vol. 14, p. 311-316, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.03.060.
- [8] B. Bringmann et W. Knapp, « Machine tool calibration: Geometric test uncertainty depends on machine tool performance », *Precis. Eng.*, vol. 33, n° 4, p. 524-529, oct. 2009, doi: 10.1016/j.precisioneng.2009.02.002.
- [9] S. Weikert, « R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools », *CIRP Ann.*, vol. 53, n° 1, p. 429-432, 2004, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60732-X.
- [10] X. Lu et A. Jamalain, « A new method for characterizing axis of rotation radial error motion: Part 1. Two-dimensional radial error motion theory », *Precis. Eng.*, vol. 35, n° 1, p. 73-94, janv. 2011, doi: 10.1016/j.precisioneng.2010.08.005.
- [11] A. Vissiere, H. Nourira, M. Damak, O. Gibaru, et J.-M. David, « A newly conceived cylinder measuring machine and methods that eliminate the spindle errors », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, n° 9, p. 094015, sept. 2012, doi: 10.1088/0957-0233/23/9/094015.
- [12] Z. He, J. Fu, L. Zhang, et X. Yao, « A new error measurement method to identify all six error parameters of a rotational axis of a machine tool », *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 88, p. 1-8, janv. 2015, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2014.07.009.
- [13] C. J. Evans, R. J. Hocken, et W. T. Estler, « Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and 'Absolute Testing' », *CIRP Ann.*, vol. 45, n° 2, p. 617-634, 1996, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60515-0.
- [14] E. Marsh, *Precision Spindle Metrology, Second Edition*. Lancaster: DEStech Publications, Incorporated, 2009.
- [15] D. J. Whitehouse, « Some theoretical aspects of error separation techniques in surface metrology », *J. Phys. [E]*, vol. 9, n° 7, p. 531-536, juill. 1976, doi: 10.1088/0022-3735/9/7/007.

# Identification paramétrique pour un modèle de comportement dynamique d'une machine de forge

C. Durand <sup>a,\*</sup>, H. Song <sup>a</sup>, R. Bigot <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Arts et Metiers Institute of Technology, Université de Lorraine, LCFC, HESAM Université, F-57070 Metz, France

\* e-mail : camille.durand@ensam.eu

## 1. INTRODUCTION

Pour les procédés de forgeage nécessitant l'emploi de machines de forge limitées en énergie, comme les presses à vis ou les marteaux pilons, il est difficile de prédire avec précision la quantité d'énergie absorbée par le lopin en déformation plastique. Cela est dû au comportement dynamique des machines qui engendre des pertes d'énergie. C'est pourquoi des modèles dynamiques des machines de forge ont été développés : premièrement, des modèles masse-ressort pour des pilons simple effet [1,2] puis des modèles avec amortisseurs en parallèle des ressorts [3,4]. Pour ces modèles, les paramètres sont identifiés de façon théorique en se basant sur les spécifications machines. Mais de nos jours, avec le développement des caméras rapides et des systèmes de stéréovisions, des campagnes expérimentales seraient envisageables même sur les pilons. Par exemple, la vitesse d'impact a été mesurée sur un pilon contre frappe et l'énergie cinétique a été déduite afin de déterminer l'efficacité de la frappe [5,6]. De plus, Yoneyama [7] a été capable de surveiller l'effort, la pression, les frottements et la température de contact pendant le refoulement de cylindres d'acier sous un pilon simple effet. Différentes technologies de capteurs pour suivre le déplacement du coulisseau et les efforts de forgeage ont aussi été comparés dans le cas d'une presse à vis [8]. Et finalement, un modèle dynamique consistant en un modèle masse-ressort-amortisseur a été déterminé expérimentalement pour un pilon [9]. Pour identifier les paramètres d'un tel modèle, cela requiert des méthodes numériques d'optimisation. Mais pour garantir l'unicité du résultat, la justesse et la fiabilité des paramètres identifiés, la fonction de coût doit être correctement définie [10] et une étude de sensibilité peut être réalisée.

Dans cette étude, la méthode développée dans des travaux précédents pour déterminer un modèle dynamique à partir d'expériences [9], sera appliquée à une presse à vis. Une fois le modèle identifié, une

identification paramétrique sera conduite avec différentes fonctions de coûts et les résultats seront analysés. A partir de cette analyse, une fonction de coût sera choisie pour la suite et une étude de sensibilité sera conduite pour assurer une identification juste du modèle.

## 2. LE SYSTEME DE PRODUCTION ET SON MODELE DYNAMIQUE

L'étude se concentre sur la presse à vis de la plateforme Vulcain à Metz (Figure 1). C'est une presse à vis à commande directe SPR 400 de Lasco avec une énergie maximale de 28,9kJ et une vitesse maximale de 680mm/s.



Figure 1 – La presse à vis de la plateforme Vulcain à Metz

Un porte outil spécifique est monté sur la presse afin de pouvoir suivre des données comme l'effort de forgeage grâce à un capteur d'effort intégré sous la matrice inférieure (fixe) et le déplacement du coulisseau grâce à 3 capteurs laser fixés à la matrice inférieure et grâce au codeur magnétique incrémental intégré à la presse [11].

Une campagne expérimentale a été lancée pour déterminer le modèle dynamique, appelé modèle BIM (Billette Interface Machine) [9], de la presse à vis. Connaissant les conditions initiales et enregistrant l'effort de forgeage en fonction du temps pour des frappes à vide (Figure 2), c'est-à-dire des frappes sans lopin mais avec contact entre l'outil inférieur et supérieur, le modèle peut être déterminé selon la méthode décrite par [9]. La fréquence d'acquisition de tous les capteurs est fixée à 500Hz. Une transformée de Fourier rapide (FFT) est réalisée sur le signal de l'effort enregistré pendant la frappe (Figure 3). Dans l'idéal il faudrait une analyse avec plus de niveaux de fréquences, mais la courte durée de l'impact ne le permet pas dans l'expérience choisie.

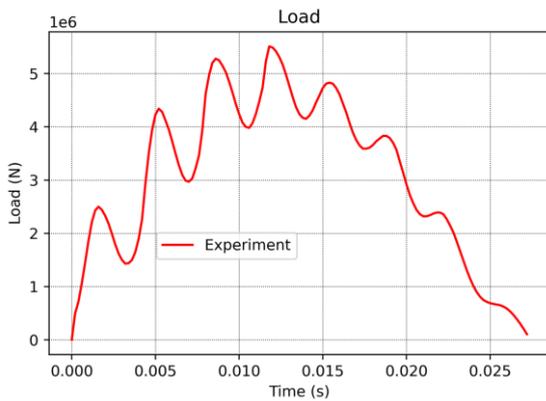


Figure 2- L'effort enregistré par le capteur intégré à la matrice inférieure

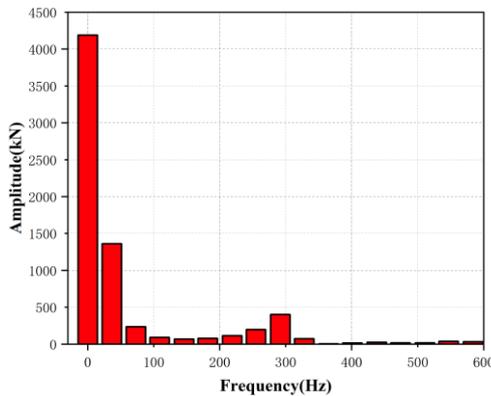


Figure 3- Transformée de Fourier (FFT) du signal de l'effort

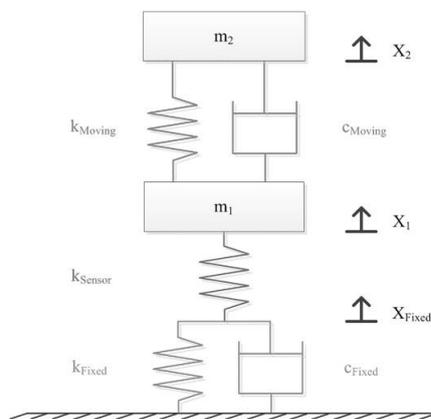


Figure 4- Le modèle de la presse à vis et de ses outillages pendant une frappe à vide (sans lopin)

Deux pics sont identifiés, donc un modèle à deux degrés de liberté sera capable de décrire le comportement dynamique de la presse (Figure 4). Le capteur d'effort est considéré dans le modèle au travers du ressort  $k_{sensor}$  et sa valeur de raideur est fixée à  $3,3997 \cdot 10^{10}$  N/m comme donnée par le constructeur. L'ajout de ce ressort permettra la comparaison des courbes d'efforts expérimentales et simulées. La vitesse d'impact initiale est connue grâce au capteur de déplacement du coulisseau et est de 365mm/s. Cette vitesse correspond à la vitesse initiale des masses  $m_1$  et  $m_2$ , ces vitesses sont notées  $v_1$  et  $v_2$ .

### 3. IDENTIFICATION PARAMETRIQUE

Une fois le modèle défini, et les conditions initiales déterminées ( $v_1$  et  $v_2$ ), les paramètres du modèle ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $k_{fixed}$ ,  $k_{moving}$ ,  $c_{fixed}$ ,  $c_{moving}$ ) doivent être identifiés grâce à des méthodes numériques d'optimisation. Les optimisations sont programmées sur Python. Tout d'abord, une première fonction de coût a été définie en se basant sur l'effort en fonction du temps et en utilisant la méthode des moindres carrés, mais dans la plupart des cas, le second mode de vibration disparaissait. Ainsi, même si cela peut paraître redondant, la FFT a été ajoutée à la fonction de coût afin de garantir la prise en compte du second mode de vibration. Pour garantir une bonne identification, trois fonctions de coûts différentes ont été analysées. Pour minimiser la valeur de ces fonctions de coût, des algorithmes des moindres carrés (1) ou des algorithmes de gradient (2) (3) [10] ont été utilisés :

$$FC1(\text{effort}, FFT) = f \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(\text{effort}_i^{exp} - \text{effort}_i^{sim})^2}{\|\text{effort}^{exp}\|^2} + \quad (1)$$

$$(1-f) \cdot \sum_{i=1}^m \frac{(FFT_i^{exp} - FFT_i^{sim})^2}{\|FFT^{exp}\|^2}$$

$$FC2(\text{effort}, FFT) = f \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\text{effort}_i^{exp} - \text{effort}_i^{sim})^2}{\|\text{effort}^{exp}\|^2}} + \quad (2)$$

$$(1-f) \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(FFT_i^{exp} - FFT_i^{sim})^2}{\|FFT^{exp}\|^2}}$$

$$FC3(\text{effort}, FFT) = f \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\text{effort}_i^{exp} - \text{effort}_i^{sim})^2}{\text{effort}_i^{exp^2}}} + \quad (3)$$

$$(1-f) \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(FFT_i^{exp} - FFT_i^{sim})^2}{FFT_i^{exp^2}}}$$

Avec  $\text{effort}^{exp}$  l'effort enregistré par le capteur intégré à la matrice inférieure et  $FFT^{exp}$  la FFT déduite à partir du signal d'effort, et  $\text{effort}^{sim}$  l'effort simulé avec le modèle et  $FFT^{sim}$  la FFT déduite de l'effort modélisé.

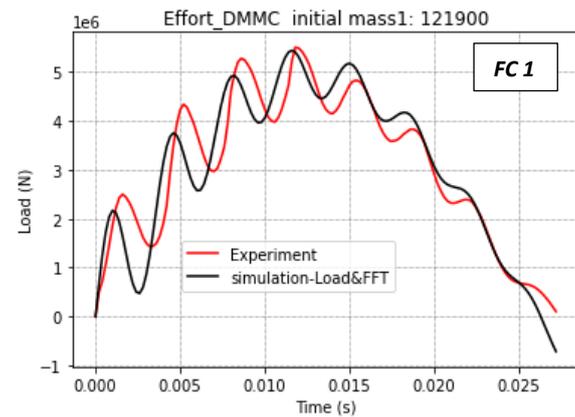
Avec  $f$  un coefficient de poids pour l'effort et la FFT,  $f$  a été choisi égal à 0,5 suite à une étude préalable.

Avec  $n$  et  $m$  le nombre de points disponibles avec une fréquence d'acquisition de 500 Hz sur une durée de 0.025s de contact lors de la frappe.

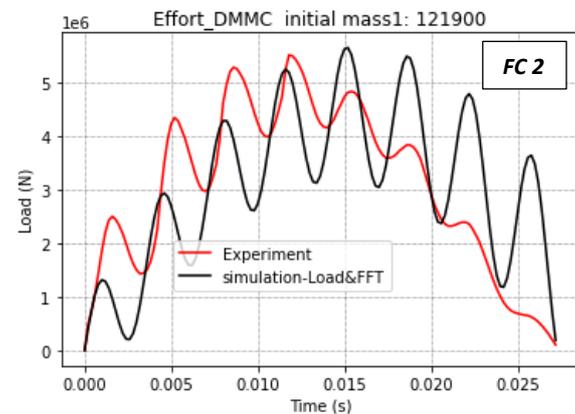
#### 4. RESULTATS ET DISCUSSION

L'effort en fonction du temps et la FFT ont été tracés pour trois fonctions de coûts différentes et sont comparés aux résultats expérimentaux (Figure 5 et Figure 6). Pour chaque fonction, la valeur du coût est aussi indiquée. Les trois courbes d'effort obtenues sont significativement différentes mais les trois FFT sont assez proches et se superposent assez bien à la FFT issue de l'expérimental. Concernant les courbes d'effort, un déphasage est observé dans toutes les courbes ainsi qu'une différence d'amplitude.

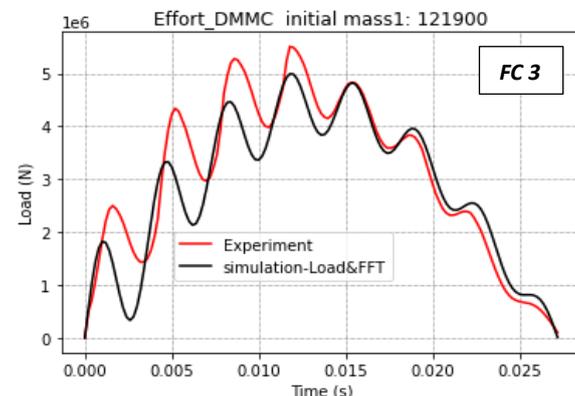
Comme FC1 et FC2 ont des définitions très proches (FC2 a juste une racine carrée en plus), les résultats devraient être proches également, mais ce n'est pas le cas. La courbe d'effort pour FC2 est singulière comparé à celle de FC1 et FC3. L'effort issu de l'expérience peut être décrit ainsi : au début de l'impact, l'effort augmente avec d'importantes variations jusqu'à atteindre un maximum, puis l'effort diminue avec des variations plus faibles et plus lisses, sous l'effet de l'amortissement. FC1 et FC3 suivent cette même tendance, mais ce n'est pas le cas de FC2. Cela peut être expliqué par le fait que les fonctions de coûts trouvent des minimums locaux différents.



Target value :  $4,68 \cdot 10^{-3}$



Target value : 1,29



Target value :  $1,11 \cdot 10^{-3}$

Figure 5- Comparaison des signaux d'efforts expérimentaux et simulés pour les 3 fonctions de coûts différentes

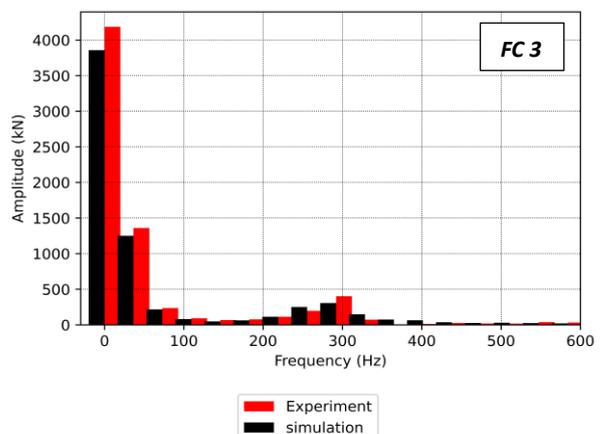
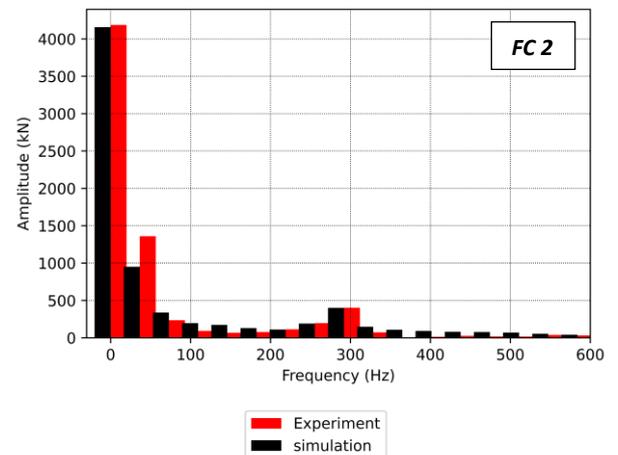
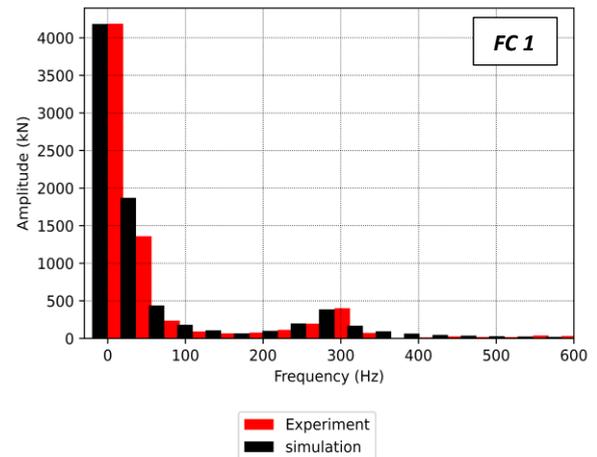


Figure 6- Comparaison des FFT sur les signaux d'effort expérimental et simulés pour les 3 fonctions de coûts différentes

En se basant sur ces résultats, seule la fonction de coût FC3 est choisie pour réaliser une étude de sensibilité car elle présente la meilleure adéquation avec les résultats expérimentaux : elle parvient bien à prédire le second mode de vibration et son amortissement en étant proche du maximum d'effort et avec seulement un léger déphasage.

## 5. ETUDE DE SENSIBILITE

Pour assurer la convergence des algorithmes vers un minimum, un critère sur la variation de la fonction de coût est définie et appelée *TolFun*. La minimisation est stoppée si à l'incrément  $i+1$  l'équation (4) est vérifiée :

$$\frac{|FC3(\text{effort}, FFT)_i - FC3(\text{effort}, FFT)_{i+1}|}{|FC3(\text{effort}, FFT)_i|} < TolFun \quad (4)$$

La valeur de *TolFun* est obtenue grâce à une étude de convergence : l'optimisation est lancée avec une valeur de plus en plus petite et l'identification des paramètres et des valeurs de coût pour chaque valeur de *TolFun* sont comparées. Quand la variation de ces paramètres est inférieure à 1%, la valeur de *TolFun* est considérée comme adéquate. Il n'y a pas d'amélioration significative de la fonction de coût ou de variation des paramètres identifiés pour les valeurs de *TolFun* inférieures à 0,1. Donc *TolFun* est fixée à 0,1.

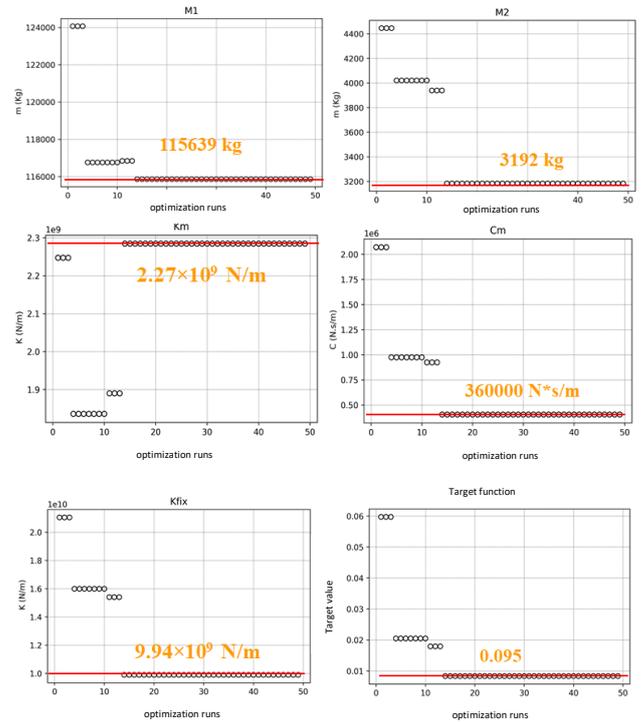
**Tableau 1 – fonction de coût et valeurs des paramètres pour différents critères de convergence**

Critère convergence	Fonction de coût	M <sub>2</sub> [kg]	C <sub>moving</sub> [N.s/m]	K <sub>moving</sub> [N/m]
1	1,5.10 <sup>15</sup>	3207	730117	2,07.10 <sup>9</sup>
1e <sup>-1</sup>	1,1.10 <sup>-3</sup>	3192	360000	9,94.10 <sup>9</sup>
1e <sup>-2</sup>	1,1.10 <sup>-3</sup>	3192	360000	9,94.10 <sup>9</sup>
1e <sup>-3</sup>	1,1.10 <sup>-3</sup>	3192	360000	9,94.10 <sup>9</sup>
1e <sup>-4</sup>	1,1.10 <sup>-3</sup>	3192	360000	9,94.10 <sup>9</sup>

Satisfaire l'équation (4) n'est pas suffisant pour assurer la convergence vers un minimum global. Le set de paramètres initiaux peut aussi avoir un impact sur la solution trouvée par l'algorithme. Les paramètres initiaux sont définis grâce aux documentations fournisseurs quand c'est possible, et une analyse de sensibilité de l'optimisation sur les paramètres initiaux est réalisée. Pour cela 50 nouveaux sets de paramètres initiaux sont générés en créant une perturbation de +/- 10% selon une loi uniforme sur les paramètres références. 46 optimisations sur les 50 convergent vers la même valeur de coût avec les mêmes paramètres identifiés, ainsi un minimum global semble avoir été trouvé.

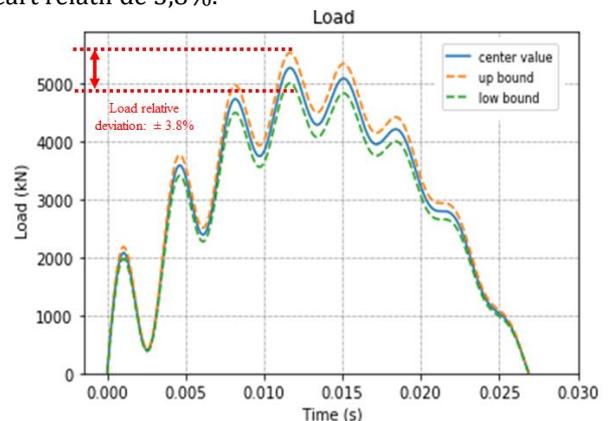
Ensuite une étude de sensibilité de l'optimisation sur la vitesse initiale du coulisseau est réalisée. 50 optimisations sont lancées avec 50 valeurs différentes pour les vitesses initiales  $v_1$  et  $v_2$  : les 50 valeurs de

vitesses initiales sont générées en créant une perturbation de +/- 5% selon une loi uniforme sur la valeur des vitesses initiales de référence. Les résultats sont tracés (Figure 7) : 37 optimisations convergent vers la même valeur coût avec les mêmes paramètres identifiés.



**Figure 7- Valeurs des paramètres identifiés ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $K_{moving}$ ,  $K_{fixed}$ ,  $C_{moving}$ ) et les valeurs coûts pour les 50 optimisations lancées avec 5% d'incertitudes sur les vitesses initiales**

L'impact de la vitesse sur l'effort simulé au ressort  $k_{sensor}$  est aussi intéressant. Ainsi, des optimisations ont tourné avec +/-10% d'incertitudes sur la vitesse initiale et l'influence sur l'effort a été tracée (Figure 8). Des erreurs d'incertitudes sur la détermination de la vitesse à l'impact affecte seulement l'amplitude de l'effort avec un écart relatif de 3,8%.



**Figure 8 – Courbes de l'effort simulé pour les +/- 10% d'incertitudes sur la vitesse initiale du coulisseau**

Finalement l'impact de l'identification des paramètres sur l'effort simulé est étudié. Pour cela, 10% d'incertitudes sur la valeur des paramètres identifiés est prise en compte et l'effort obtenu par simulation est tracé

(Figure 9). Une erreur d'incertitude sur l'identification des paramètres entraîne une erreur sur l'effort de 1,5% et affecte à la fois l'amplitude et les modes de vibrations.

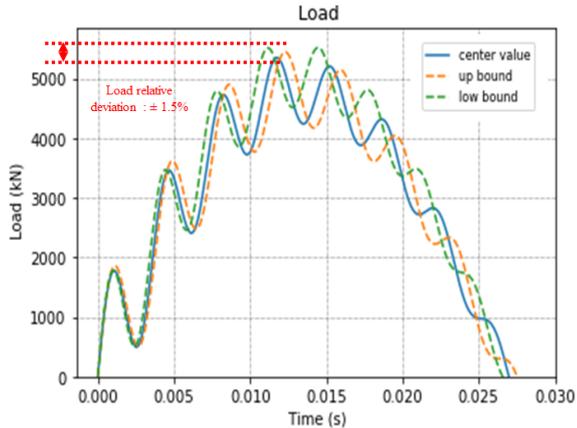


Figure 9 – Courbes de l'effort simulé pour les +/-10% d'incertitudes sur le set de paramètres identifiés

## 6. DISCUSSION

Concernant l'identification paramétrique, déjà trois fonctions de coût différentes ont été testées et celle qui semblait donner les meilleurs résultats a été choisie. Malgré ces différents tests, d'autres fonctions de coût pourraient encore être testées et le choix de la meilleure fonction de coût pourrait être différent. L'étude pourrait aussi être élargie en testant différents algorithmes pour s'assurer de trouver un minimum global. Par ailleurs, actuellement la fonction de coût considère l'effort en fonction du temps ainsi que la FFT de ce signal, mais il se pourrait que la fonction de coût puisse être encore d'avantage améliorée si le déplacement du coulisseau était pris en compte. Dans ce cas, le coefficient  $f$  de la fonction de coût devrait être modifié, pour donner un poids différent à chaque terme.

Puis, avec la fonction de coût choisie, une étude de sensibilité de l'algorithme sur le set de paramètres initial a été conduite. Les résultats convergent, donc il semble qu'un minimum global ait été trouvé. Pour s'assurer de ce fait, l'étude pourrait être encore élargie avec une plus grande étendue de perturbation sur le set de paramètres initiaux et avec un plus grand nombre d'optimisations.

L'impact de l'incertitude des conditions de vitesses initiales sur les paramètres identifiés ainsi que sur l'effort simulé a été considéré. Pour l'identification paramétrique, les résultats sont convergents, plus de la moitié des paramètres identifiés sont les mêmes malgré les incertitudes sur les vitesses initiales. Ainsi l'optimisation n'est pas vraiment sensible aux incertitudes sur la vitesse du coulisseau. Quant à l'effort simulé, des écarts inférieurs à 4% sont observés lorsque des incertitudes sur les vitesses initiales sont introduites. Ces écarts concernant l'effort simulé sont donc négligeables.

Enfin les incertitudes sur l'identification du set de paramètres ont un impact sur l'amplitude et le déphasage de l'effort. Un écart de 1,5% sur l'amplitude de l'effort a été observé, ce qui reste très faible.

## 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce travail préliminaire sur l'identification paramétrique d'un modèle de comportement dynamique d'une machine de forge, une fonction de coût a été choisie et une étude de sensibilité sur l'optimisation a été conduite. Pour les intervalles d'incertitudes étudiés, les résultats sont encourageants car ils montrent une faible sensibilité de l'algorithme aux perturbations sur les conditions initiales et sur le set de paramètres initial. Mais l'étude doit être poursuivie en testant d'autres algorithmes et des intervalles d'incertitudes plus grand pour s'assurer que l'identification réalisée est bien correcte.

De plus, ici l'identification paramétrique est réalisée sur un modèle de presse et de ses outillages obtenu grâce à des frappes à vides (sans lopin). Il pourrait donc être intéressant de valider les paramètres identifiés dans le cas d'un modèle intégrant des frappes sur un lopin.

Par ailleurs, le modèle présenté est valide pour un système de production complet, comprenant la presse ainsi que ses outillages, mais comme plusieurs outils peuvent être montés sur une seule et même presse, il pourrait être judicieux de dissocier le modèle des outils de celui de la machine. Et cela nécessiterait une nouvelle fois des modifications dans la définition de la fonction de coût.

## RÉFÉRENCES

- [1] Tobias S (1985) Survey of the development of Petro-Forge forming machines. *Int J Mach Tool Des Res* 25:105–197
- [2] Vajpayee S, Sadek MM, Tobias SA (1979) The efficiency and clash load of impact forming machines to the second order of approximation. *Int J Mach Tool Des Res* 19:237–252.
- [3] Vajpayee S, Sadek MM (1977) Analytical study of forming efficiency as influenced by the process and the machine structure. *Int J P r o d Res* 15 : 2 03–218 .
- [4] Gregorian V, Sadek MM, Tobias SA (1976) Noise generated by a laboratory drop hammer and its interrelation with the structural dynamics and process parameters. *Int J Mach Tool Des Res* 16: 301–318.
- [5] Galdos L, de Argandoña ES, Herrero N et al (2014) The calibration of high energy-rate impact forging hammers by the copper-column upsetting method and high speed Camera measurements. *Key Eng Mater* 611–612:173–177.
- [6] Chen R, Li Z, Zhong K, Liu X, Wu Y, Wang C, Shi Y (2019) A stereo-vision system for measuring the ram speed of steam hammers in an environment with a large field of view and strong vibrations. *Sensors* 19:996.
- [7] Yoneyama T (2017) Development of a friction sensor for hot forging. *Int J Adv Manuf Technol* 90:2251–2261.
- [8] Durand, C., Freund, L., Baudouin, C., Bigot, R., & Guérin, J. D. (2021). Comparison of different sensor technologies to monitor a forging process. 24th Int. Conf. on Material Forming ESAFORM (2021), Liège, Belgique,
- [9] Mull, J. F., Durand, C., Baudouin, C., & Bigot, R. (2020). A new tailored solution to predict blow efficiency and energy consumption of hammer-forging machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(7), 1941–1954.
- [10] G Venet, C Baudouin, C Pondaven, R Bigot, T Balan, Parameter identification of 42CrMo4 steel hot forging plastic flow behaviour

using industrial upsetting presses and finite element simulations,  
International Journal of Material Forming 14 (2021) 929-945

- [11] Durand, C., Bigot, R., Baudouin, C., 2018b. Contribution to the characterization of metal forming machines: application to screw presses. 17th Int. Conf. Met. Form. Met. Form. 2018 16-19 Sept. 2018.



# Estimation de la couverture de configurations de numérisation 3D à l'aide de techniques d'apprentissage machine

Tingcheng LI <sup>a</sup>, Arnaud POLETTE <sup>a</sup>, Ruding LOU <sup>b</sup>, Jean-Philippe PERNOT <sup>a\*</sup>, Manon JUBERT <sup>c</sup>, Dominique NOZAIS <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Arts et Métiers Institute of Technology, LISPEN, HESAM Université, F-13617 Aix-en-Provence, France

<sup>b</sup> Arts et Métiers Institute of Technology, LISPEN, HESAM Université, F-71100 Chalon-sur-Saone, France

<sup>c</sup> Innovative - Manufacturing and Control, I-MC, F-84120 Aix-en-Provence, France

\* e-mail : jean-philippe.pernot@ensam.eu

## 1. INTRODUCTION

Today, optical sensors are widely used in various measurement scenarios, e.g. on-board laser lidar for autonomous driving, structured light-based scanner for part measurement, and electronic total station for BIM applications. Compared with other techniques, the 3D reconstruction measurement system based on vision (e.g. structured light) have superiority on obtaining much greater number of surface points, efficiency and ease of use [1]. The existing research on scan view planning problem with the known model and vision measurement tools usually uses only the visibility analysis on the CAD model of the part to determine the possible scan surface [1] while the studies ignore the parameters that affect the scan, which makes the possible scanned area and the real reconstructed region different.

Indeed, lots of parameters affect the quality of the acquired point cloud, such as the choice of the scanner poses including its orientation with respect to the surfaces to be scanned, the roughness of the surfaces, the material and so on. Understanding correctly how these parameters influence the quality of one scan is a difficult task because the parameters are coupled, and their influence cannot be summarized concisely by an explicit formula. The research carried out in this paper focuses on the use of structured light-based scanning device, with the objective of identifying how a scanning configuration and its parameters affect the quality of the obtained point clouds.

To assess the quality of the scanning configuration including the pose of the scanner as well as the influencing parameters characterizing the way the part is scanned

(e.g. exposure, light distribution, roughness and materials), three problems should be solved: (1) how to measure the quality of a point cloud for a given configuration; (2) what are the parameters characterizing a configuration and considered as influencing parameters; (3) how to predict the quality of a configuration from its influencing parameters.

For the first question, researchers proposed several indicators to characterize the quality of the scanning results with respect to the adopted configuration. For instance, the measurement performance indicators and the statistical indicators have been proposed and compared on acquisitions from structured light device and from photogrammetry [2]. Based on this work, Li et al [3] summarizes the existing assessment metrics and explored new metrics for a single scan. It was notably found that some indicators (such as density [4] or dispersion [2]) do not vary a lot when the poses change, while the coverage indicator is more sensitive to the change and can thus be considered as a variable to be optimized when looking for an optimal scanning configuration. As a consequence, this work focuses on the a priori prediction of the coverage indicator from various scan configurations, in order to be able to estimate the coverage that will be obtained but before really scanning.

For the 2nd question, previous studies mainly analysed the influencing parameters in terms of the principle of reconstruction. In this paper, the influencing parameter are divided into three groups: (a) influencing factors brought about by the reconstruction method; (b) properties of the measured object; (c) parameters related to the scanning environment. Considering the group (a), two factors are

here considered: (I) the construction of the hardware, including the layout of the cameras, the lens, the resolution of the cameras and the projector for projecting the pattern series and so on; (II) the calibration error. It is noticeable that much effort is put on the later. It experienced the evolution of the camera model, and the development of the 3D calibration objects to 2D calibration objects. For group (b), the properties of measure object consist of the material of parts, processing methods, surface treatment process, and geometric features. The distribution and intensity of the environmental light, and the ambient temperature are considered in group (c).

To deal with the 3rd question with so many coupled influencing parameters, the use of neural network has been investigated in this paper to find a coverage estimator. Neural networks achieved much reputation on 2D tasks in classification and semantic segment, and it has been extended in various contexts now with its reputation that it can fit implicit functions to handle coupled multi-parameter tasks. Convolution neural network is widely used in structured data. LeNet-5 [8] was proposed in 1998 with class convolutional network structure: convolution-pooling-fully connected. AlexNet [9] followed the strategy was validated in the ImageNet competition. Then, VGGNet [10] and GoogleNet [11] were proposed with more convolutional layers but degradation problem was found that the accuracy of the network saturates or even decreases while the network depth increases. Kaiming He et al. [12] designed the residual block to solve this problem. Also, inception block was designed with extracting features in different scale space. Attention mechanism and transformer [13] have been proposed one after another. Our work makes contributions on threefold: (a) a novel 3D reconstruction prediction framework able to evaluate the coverage of the scanning configurations with a deep segmentation network; (b) several physical acquisition platforms built together with the digital twins, able to operate the scanning task with auto-registration; (c) one database including real scan point clouds of parts, scanner configurations, and scan data virtually generated from the CAD model, able to explore the methods of registration, analysis related to point cloud and so on. The work could be used for scan view plan problem on binocular stereo measurement to optimize the pose of the scanner.

The paper is organized as follows. Section 2 presents the overall framework of the work. The experimental validation is detailed in Section 3 and Section 4 ends this paper with conclusion and perspectives.

## 2. METHODOLOGY

This section introduces the acquisition platform for the creation of the database and the novel coverage prediction framework. The former offers the required data with scanning configurations for training the latter.

### 2.1. Acquisition platform

Several equipments have been set up and integrated within the acquisition platform, to perform the scan tasks

required to build the database used for the learning step. It consists of a CNC machine DMU 50 with an integrated probe, a structured light-based scanner GOCATOR 3210 by LMI, an UR5 robot, the PC to control the whole platform, a thermometer and a luminometer. The acquisition platform includes two parts: CNC platform (Figure 1) and robot platform (Figure 2). Each platform take part to the acquisition tasks, and the two platforms can be merged into one semi-automatic platform (Figure 3).

According to Li et al. [3], the coverage of a scan characterizes the way the surface of the geometric model of a part being digitized is covered. This metric is evaluated for each facet  $j$  of the triangle mesh associated to the CAD model of the scanned part. If the number of points  $N_j^{pts}$  of the scanned point cloud associated to the  $j$ -th facet is over a threshold, the facet is considered as *covered* (1). Otherwise, the  $j$ -th facet is not covered and it is considered as a *zero* (0) facet in this paper. Thus, the computation of this

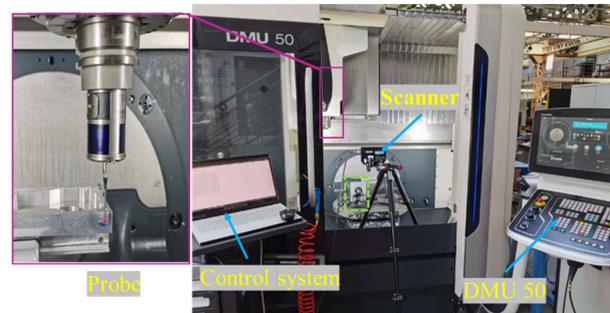


Figure 1 - CNC platform



Figure 2 - Robot platform

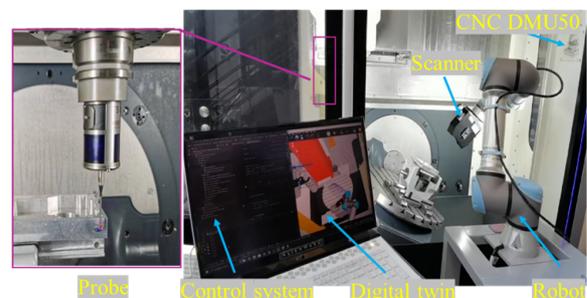


Figure 3 - Semi-automatic acquisition platform

indicator requires the point cloud to be aligned to the associated CAD model. To do so, the digital twin of the entire platform is established to record the position and orientation details, especially the **registration matrices** needed for the calculation of the coverage indicator.

The essence of the digital twin is more related to the coordinate system transformation. For the CNC platform, the matrix  $\mathbf{H}_{gt}$  defines the transformation from the global coordinate system (CSYS)  $O_gXYZ$  to the one of the rotating table  $O_tXYZ$  (Figure 4) and its values can be found in the user manual or measured. Then, the transformation matrix  $\mathbf{H}_{gp}$  between the workpiece and the global coordinate system can be calibrated by the probe of the CNC machine (Figure 5), and indirectly acquired  $\mathbf{H}_{pt}$  by Equation (1). After scanning and doing registration with registration matrix  $\mathbf{H}_{cp}$  (point cloud to part transformation), the scanner can be positioned in the digital twin with Equation (2). Finally, the digital twin is set up as in Figure 6. Once the calibration performed, the acquisitions can start, the table is successively rotated, and the acquisitions obtained for each position of the table, each acquisition being then located in the digital twin using the transformation matrices.

$$\mathbf{H}_{pt} = \mathbf{H}_{pg}\mathbf{H}_{gt} \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_{ct} = \mathbf{H}_{pt}\mathbf{H}_{cp} \quad (2)$$

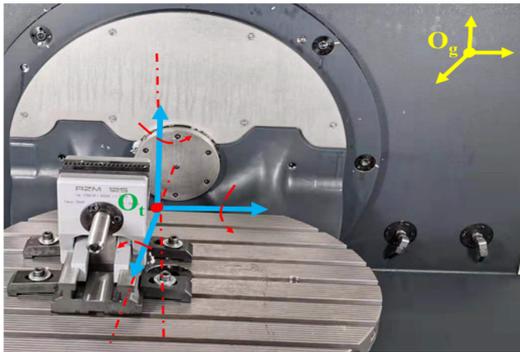


Figure 4 - The rotation table and global coordinate system

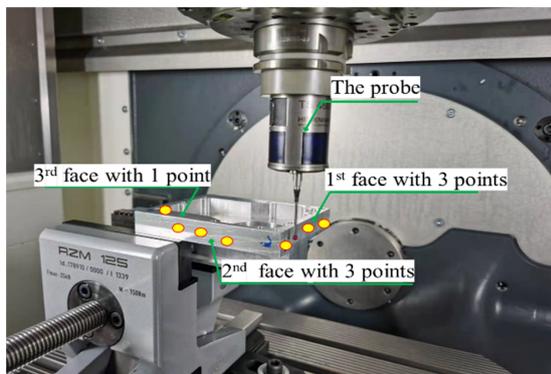


Figure 5 - Position the workpiece in the CNC CSYS

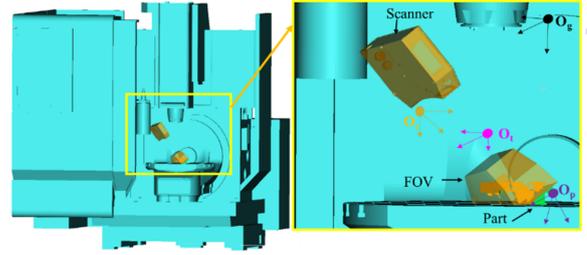


Figure 6 - Digital twin of the CNC acquisition platform

For the robot acquisition platform (Figure 7), it has 4 coordinate systems: robot base coordinate system  $O_bXYZ$ , end coordinate system  $O_eXYZ$ , scanner coordinate system  $O_cXYZ$ , and workpiece coordinate system  $O_pXYZ$ . Firstly, the transformation  $\mathbf{H}_{ce}$  (scanner to robot end) can be obtained by eye-in-hand calibration [14]. Similar to the CNC platform, the position and orientation of the part ( $\mathbf{H}_{pb}$ ) can be analyzed after one registration of the scan result  $\mathbf{H}_{cp}^{(initial)}$  using Equation (3). For each robot pose, the pose of the robot end under  $O_bXYZ$  ( $\mathbf{H}_{eb}^{(j)}$ ) is obtained from the robot control panel and the registration matrix for each pose acquisition  $\mathbf{H}_{cp}^{(j)}$  is calculated by Equation (4).

$$\mathbf{H}_{pb} = \mathbf{H}_{eb}^{(initial)}\mathbf{H}_{ce}(\mathbf{H}_{pc}^{(initial)})^{-1} \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_{pc}^{(j)} = (\mathbf{H}_{pb})^{-1}\mathbf{H}_{eb}^{(j)}\mathbf{H}_{ce} \quad (4)$$

At the end of the calibration step, all transformation matrices are known and can be used to reposition the numerous scanned point clouds onto the corresponding CAD models and thus be able to build the database automatically labelled with coverage information.

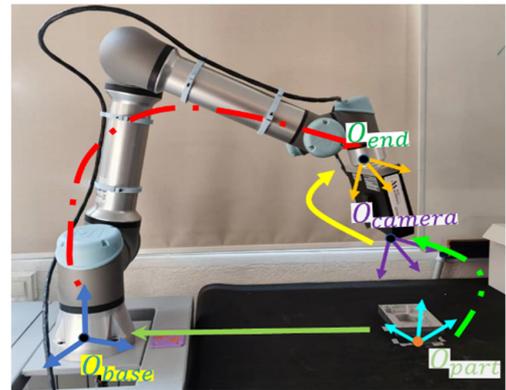


Figure 7 - Position the workpiece in the robot base CSYS

## 2.2. Prediction model construction

Using the previously acquired labelled database, the prediction model can be trained and tested. This subsection briefly details the structure of the model.

In this paper, only a subset of the influencing factors has been considered: parameters of the workpiece, manufacturing aspects through the texture and part of the configuration. Other aspects related to the material, to the

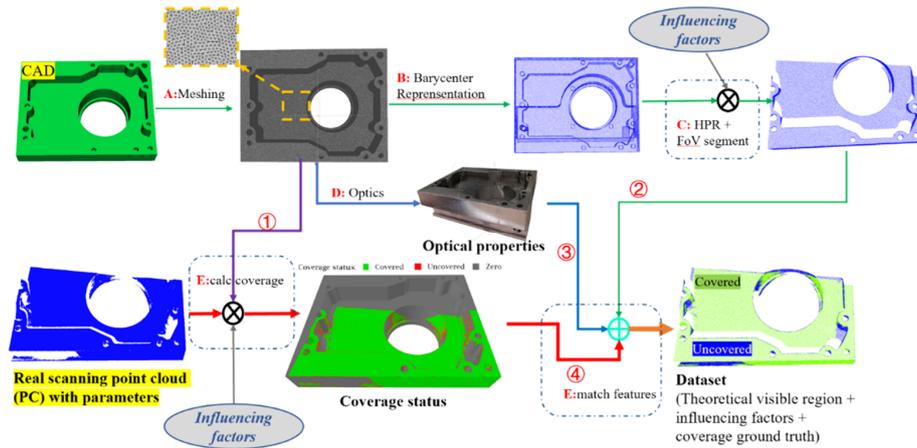


Figure 8 - Flowchart of generating dataset for training

lightning, to the ambient temperature and so on have not been considered in this study. The flowchart used to create the dataset is shown in Figure 8, wherein one labelled sample of the dataset (bottom right) is created from a real scan (bottom left) and from the CAD model (top left). The standardized mesh is obtained after CAD meshing (step A) while controlling the length of the edges considering the resolution of the scanner. In this work, the point cloud representation is chosen for its convenience, so barycenter is used instead of the facet (step B). After compressing the representation, hidden point removal algorithm and field of view (FOV) is used to segment redundant points and thus obtain the theoretical point cloud in Step C. The visual characteristics of the real workpiece are also considered using textures in Step D. In step E, the coverage is calculated with the real point cloud, transformation matrices, and the standardized mesh. It should be pointed out that the mesh is translated into the scanner coordinate system. Finally, all the features are merged into the descriptors and label for each facet/barycenter. The descriptors used in this paper are shown in Figure 9, where the count of values of each feature are 3, 3, 43 respectively.

Normalized Coordinate(3 values)	Geometric Features (3 values)	Scan features (43 values)
---------------------------------	-------------------------------	---------------------------

Figure 9 - Elements of one descriptor for training

The architecture of the developed prediction model is based on U-Net and can be divided into 2 parts: encoder (block B of Figure 10) and decoder (block C of Figure 10). In the encoder, the input of each layer will successively be applied with a *channel attention mechanism*, and then a *convolution operation*, and next it will be merged with the original input into a new feature map. This process is described as the block A of Figure 10. Finally, the result of previous layer will take pooling operation to get a new feature as the input of the next layer. One layer of the model includes the one-layer encoder and one-layer decoder, shown as the block D. The input of the decoder consists of the up-sampling result of the previous layer and the output of the encoder in the same model layer. Each layer of the decoder does like encoder, applying the block

A and convolution. The up-sampling is done to prepare the input for the next layer.

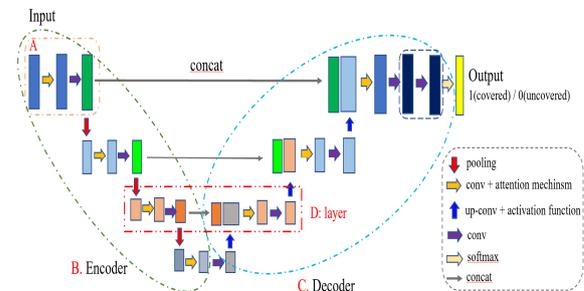


Figure 10 - Coverage prediction model

### 3. EXPERIMENTS AND RESULTS

To populate the database, several workpieces have been designed, manufactured and then scanned according to multiple poses and scanner settings. In this paper, two parts have been considered: pocket and stair-like (Figure 11) and the exposure is set to 6000 $\mu$ s. The multiple poses are visible in Figure 12 for the pocket workpiece.

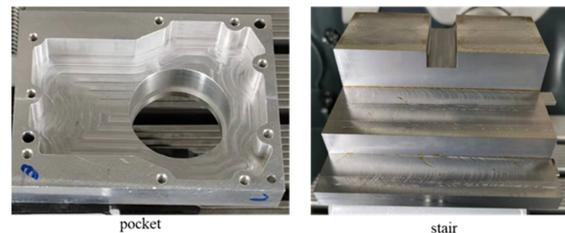


Figure 11 - Considered workpieces

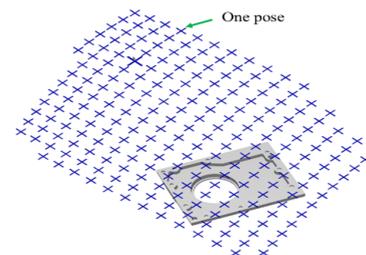


Figure 12 - Scanner poses for the pocket workpiece

The neural network inputs are prepared following the dataset generation steps in Section 2. To train the network, a subset of the acquisitions on **the pocket** are used and the remaining ones are used for testing. The stochastic gradient descent (SGD) with momentum is taken as optimization strategy to optimize the cross entropy as the loss function. The evolution of the loss function is shown in Figure 13.

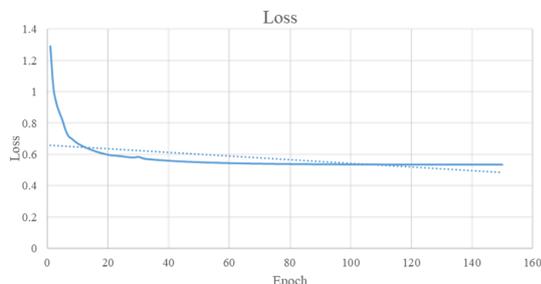


Figure 13 – Evolution of the loss function when training the network

After 150 epochs, the loss tends to be stable and the training ends. The model is then tested on the remaining acquisitions from the pocket, as well as on the acquisitions from the stair-like part that have never been used for training. *F1-score* is used to evaluate the training of the model, defined as Equation (5). *Precision* is defined as the percentage of the real covered triangles among the whole predicted covered triangles while *Recall* is defined as the percentage of the real covered triangles among the whole scanning covered triangles.

$$F1 - Score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

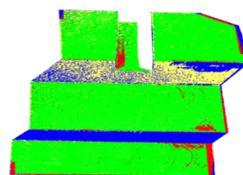
The test results are shown in Table 1 and one example of the pocket and stair-like are shown in Figure 14, where the *green* region means the region that model and ground truth both take it as *covered* (1), *blue* corresponding to the model and ground truth *zero* (0), *red* associated to one ground truth *zero* but model *covered*, and the *yellow* determining ground truth *covered* but model *zero*. For instance, on Test4, 93687 triangles that have been *covered* when scanning the stair-like are identified as *covered* by the network, and 23705 triangles that have not been *covered* are indeed identified as *zero* by the network, which is good. In yellow, the 18152 triangles that were *covered* but for which the network did not predict it properly, and in red the 6213 triangles that were not *covered* but which have been identified as *covered* by the system. This last case is certainly the worst case when considering the overall objective of optimizing the scanner position before scanning the manufactured part. Indeed, if the optimizer uses triangles estimated to be covered and which are not after the scan, there is a risk of not obtaining a good scan in reality. However, red triangles are few, and these results validate the model and its capacity to predict a priori the coverage, i.e. before scanning.

With the help of our work, the proposed large number of scanning configurations (including poses and exposure)

can be assessed in advance in the digital twin and optimized to obtain maximum coverage as few acquisitions with optimal configurations as possible.

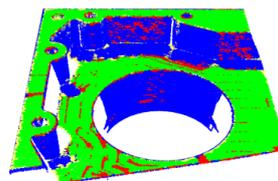
Tableau 1 – Results obtained on five test cases

Pose	Accuracy	Precision	Recall	<i>F1-score</i>
Test1	0.8560	0.8167	0.8818	0.8480
Test2	0.9052	0.8979	0.8905	0.8942
Test3	0.8920	0.9001	0.9121	0.9060
Test4	0.8281	0.9378	0.8377	0.8849
Test5	0.8823	0.8157	0.9409	0.8738



Test4		
Model \ GT	Covered	Zero
Covered	93687	6213
Zero	18152	23705

(a) Result of Test4 on the stair-like



Test5		
Model \ GT	Covered	Zero
Covered	29005	6555
Zero	1822	33812

(b) Result of Test5 on the pocket

Figure 14 – Testing examples: stair-like (a) and pocket (b)

#### 4. CONCLUSION

This work firstly analyses the influencing factors that have effects on scanning and the evaluation metrics that can be used to optimize the scanning. Based on this, the data collection platforms set up to prepare the data for the neural network have been presented. Then, the model for coverage prediction has been proposed and trained on two datasets. In the end, the method is validated, and it accurately predicts the coverage in advance of the scanning. The next steps concern the integration of this prediction model within and optimizing loop so as to identify the optimal poses and parameters of the scanner before scanning. The way light reflects on the object when scanning will also be studied, and specific features are to be identified through texture mapping.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the China Scholarship Council (No. 202006830012) and the Innovative-Manufacturing and Control (I-MC) company.

#### REFERENCES

- [1] Peuzin-Jubert, M., Polette, A., Nozais, D., Mari, J. L., & Pernot, J. P. (2021). Survey on the view planning problem for reverse engineering and automated control applications. *Computer-Aided Design*, 141, 103094.
- [2] Catalucci, S., Senin, N., Sims-Waterhouse, D., Ziegelmeier, S., Piano, S., & Leach, R. (2020). Measurement of complex freeform additively manufactured parts by structured light and photogrammetry. *Measurement*, 164, 108081.
- [3] Li, T., Lou, R., Polette, A., Shao, Z., Nozais, D., & Pernot, J. P. (2022). On the Use of Quality Metrics to Characterize Structured Light-based Point Cloud Acquisitions. *Computer-Aided Design and Applications*, 20(6), 1190-1203.
- [4] Lartigue, C., Contri, A., & Bourdet, P. (2002). Digitised point quality in relation with point exploitation. *Measurement*, 32(3), 193-203.
- [5] Hornik, K., Stinchcombe, M., & White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural networks*, 2(5), 359-366.
- [6] Kratsios, A., & Bilokopytov, I. (2020). Non-euclidean universal approximation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 10635-10646.
- [7] Tabuada, P., & Gharesifard, B. (2022). Universal approximation power of deep residual neural networks through the lens of control. *IEEE Transactions on Automatic Control*.
- [8] LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278-2324.
- [9] Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2017). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 60(6), 84-90.
- [10] Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*.
- [11] Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2016). Rethinking the inception architecture for computer vision. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2818-2826.
- [12] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 770-778.
- [13] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- [14] Shah, M. (2013). Solving the robot-world/hand-eye calibration problem using the Kronecker product. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 5(3), 031007.

# Evaluation multicritère du cycle de vie dans une perspective de développement durable : Cas de l'huile d'olive

M.A. Keskes <sup>a,b\*</sup>, A. Zouari <sup>a</sup>, R. Houssin <sup>b</sup>, D. Dhouib <sup>a</sup>, J. Renaud <sup>cb</sup>

<sup>a</sup> Université de Sfax, ISGI Sfax, Laboratoire OLID, Technopole de Sfax, 3021 Sfax-Tunisie

<sup>b</sup> Université de Strasbourg (ICUBE), 24 boulevard de la victoire 67000 Strasbourg-France

<sup>c</sup> Département de génie des systèmes(ETS), 1100 rue Notre-Dame ouest QC H3C 1K3 Montréal-Canada

\* e-mail : mohamed-amir.keskes@etu.unistra.fr

## 1. INTRODUCTION

Pendant longtemps, les recherches scientifiques se sont concentrées sur les pratiques visant à améliorer la productivité industrielle. Au cours des dernières décennies, l'accent a été mis sur les questions de durabilité, telles que la minimisation des dommages environnementaux et la réduction de l'empreinte écologique de la chaîne logistique [1]. La production industrielle consomme beaucoup d'énergie et émet de grandes quantités de gaz à effet de serre, aggravant le problème du changement climatique. Les décideurs sont désormais plus conscients des enjeux écologiques et cherchent à adopter des normes de production plus durables, éthiques et respectueuses de l'environnement [3].

Parmi les principes du développement durable « l'économie circulaire, (EC) », vise à limiter à la fois les déchets et la consommation de ressources, en transformant les déchets en ressources potentielles. Cela peut se faire notamment par le recyclage et la réutilisation d'objets, de déchets ou de produits, afin de leur donner une seconde vie. [4]. En appliquant les principes de l'économie circulaire, on peut identifier les différents scénarii de cycle de vie d'un produit. En mettant en œuvre l'évaluation environnementale du cycle de vie (AeCV), l'analyse des coûts du cycle de vie (AcCV) et l'analyse sociale du cycle de vie (AsCV), il est possible d'évaluer l'analyse de la durabilité du cycle de vie (ADCV).

L'objectif de ce papier est d'implémenter l'EC dans la chaîne logistique oléicole. Pour atteindre cet objectif, nous avons analysé, modélisé et valorisé les différents scénarii de gestion des déchets, ce qu'on appelle d'après le concept de l'EC "les boucles de retour". Notre question de recherche dans cet article est : comment aider les

décideurs à choisir les meilleures stratégies pour garantir que toutes les étapes du cycle de vie de l'olive soient circulaires et durables?. L'apport de ce travail est de proposer une meilleure configuration de la chaîne logistique de l'huile d'olive tunisienne dans une perspective de développement durable. L'approche proposée consiste à combiner la méthode Best Worst Method (BWM) , pour déterminer le poids des critères d'évaluation de la durabilité et la méthode VIKOR pour le classement des scénarii du cycle de vie, sur la base d'un ensemble de critères.

## 2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Un nombre importants de chercheurs se consacrent à la recherche des méthodes d'évaluation de la durabilité. Ces méthodes de recherche ont été appliquées dans plusieurs cas d'étude dans diverses zones agricoles, en général et ont obtenu de bons résultats. Parmi les méthodes, l'analyse de durabilité du cycle de vie nous permet d'évaluer l'impact environnemental, économique et social associé à toutes les phases de la vie d'un produit à partir de l'extraction des matières premières, la fabrication, le transport, l'utilisation et l'élimination [5].

Cependant, évaluer les impacts de la durabilité n'est pas toujours facile. C'est pourquoi, la prise de décision doit être effectuée dans le cadre de l'Analyse Décisionnelle Multi-Critères (ADMC). Par exemple, Ren [6] a développé un cadre méthodologique pour la prise de décision multicritères du cycle de vie de la production durable de bioéthanol. Ces auteurs ont attribué des poids pour les différents critères en utilisant la méthode "Analytic Hierarchy Process" (AHP), puis ils ont appliqué

la méthode VIKOR pour déterminer la séquence la plus durable des alternatives.

Dans le contexte de l'agriculture, Riesgo [7] a mené une étude visant à mesurer la durabilité des exploitations oléicoles et d'identifier le système le plus durable en Espagne. Cappelletti [8] a proposé une approche innovante pour l'évaluation de la durabilité du cycle de vie de la production de l'huile d'olive. L'AeCV, AcCV et l'AsCV sont intégrés avec une méthode multicritère AHP pour analyser et évaluer les différentes combinaisons de techniques agricoles et de procédés d'extraction d'huile d'olive dans le sud de l'Italie. Dans le même contexte, De Luca [9] évalue les pratiques de gestion des sols dans des différents scénarii oléicoles grâce à l'intégration de méthodologies basées sur le cycle de vie. Les critères AeCV, AcCV et AsCV sont intégrés dans le processus de l'AHP, qui est un outil utilisé pour l'analyse de décisions. L'utilisation de cette technique permet de définir l'importance (en termes de poids) des indicateurs de durabilité considérés, en rendant les résultats plus pertinents en Italie.

En 2021, Jellali [10] présente une approche multicritère dans un contexte « flou », permettant d'évaluer les différents scénarii, uniquement pour la phase agricole et la phase de transformation de l'huile

d'olive en Tunisie. Les auteurs ont utilisé la méthode TOPSIS qui donne un classement durable des alternatives proposées dans cette étude.

Cette revue de la littérature a mis en évidence que les outils de l'ADMC (BWS, TOPSIS et VICTOR ) sont des méthodes utiles pour évaluer la durabilité des systèmes agricoles en comparant les alternatives, en évaluant les impacts de la durabilité et en prenant des décisions contradictoires. Toutefois, il est important de noter que l'ADMC a également des inconvénients tels que la difficulté de quantifier les critères et les biais potentiels dans l'attribution des poids. En conclusion, les méthodes de prise de décision multicritères peuvent être utiles, mais il est important de les utiliser avec précaution et de prendre en compte tous les aspects de la durabilité..

### 3. METHODOLOGIE PROPOSEE

Notre étude propose une méthodologie originale, qui se compose de trois étapes présentées sur la figure 1. Cette approche est novatrice car elle intègre l'utilisation de l'SADT pour la valorisation des boucles de retour, une méthode qui n'a pas été couramment utilisée dans ce contexte auparavant.

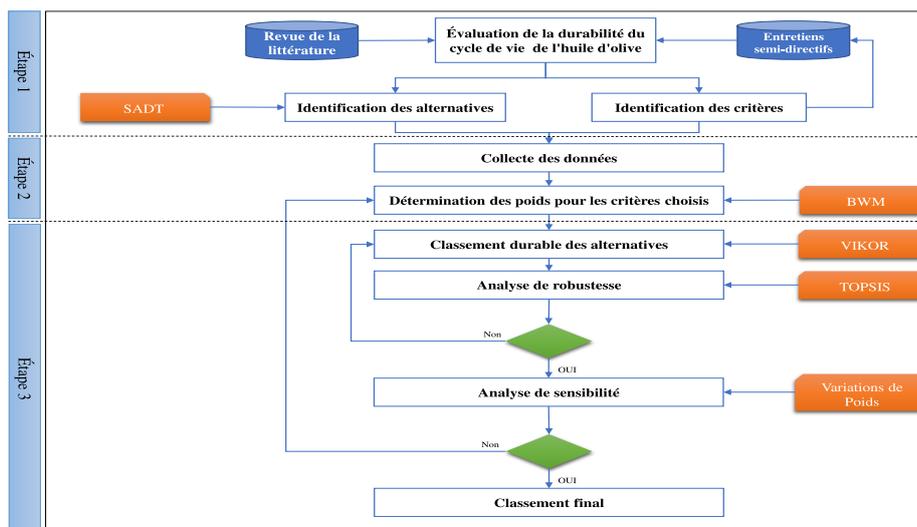


Figure 1 : Cadre de la méthodologie pour sélectionner le scénario le plus durable

- L'étape 1 consiste en une revue de la littérature sur les pratiques agricoles liées à la production d'huile d'olive, la gestion des déchets, ainsi que les études et analyses menées sur le territoire de Sfax en Tunisie. Cette revue de la littérature est complétée par des enquêtes menées auprès de décideurs, notamment dix agriculteurs de la région de Sfax et des experts de l'Institut de l'Olivier de Sfax. L'objectif de cette étape est d'extraire des alternatives, au nombre de huit, d'une part et les critères correspondant d'autre part. Pour les alternatives, la méthode « Structured analysis and design technique (SADT) » a été intégrée à notre démarche. Cette contribution scientifique nous permet d'avoir une vision plus systémique, grâce à une analyse descendante des niveaux successifs. L'SADT nous permet, de préciser de plus en plus finement le rôle de chaque élément du

système, et de préciser les boucles de retour pour chaque scénario (figure 2). Le résultat est de construire des scénarii innovants durables dans le cadre de l'économie circulaire. Concernant les critères utilisés dans cette étude (AeCV, AcCV et AsCV), ils sont validés par des experts spécialistes (agriculteur sfaxien, l'institut de l'olivier Sfax, ...) dans le domaine agricole.

- L'étape 2 intègre, la collecte des données à partir des enquêtes obtenues par les décideurs pour la construction de la matrice des décisions. Puis les valeurs des poids des critères d'évaluation de la durabilité sont déterminées à partir de la méthode BWM [11]. Celle-ci présente de nombreux avantages par rapport à la démarche ADCM, comme par exemple AHP. En raison de moins de comparaisons par paires, BWM procure un gain de temps de collecte de données, de calcul et d'analyse par rapport

à la méthode AHP. BWM fournirait des résultats avec une meilleure fiabilité et une incohérence minimale.

- L'étape 3 consiste à séquencer les différents scénarii de cycle de vie d'huile d'olive à l'aide de la méthode VIKOR. L'avantage de cette méthode est de traiter les données quelles soient qualitatives, quantitatives ou avec des unités de mesure différentes dans la matrice de décision. Pour réduire l'impact des incertitudes et des perturbations d'origine humaine, nous avons fait une analyse de sensibilité en changeant les poids des critères. Cela a permis la stabilité du résultat obtenu. Enfin, la méthode TOPSIS a été utilisée pour vérifier la robustesse des résultats du calcul de VIKOR et pour analyser la cohérence des résultats.

### 3.1. Calcul des poids des critères à partir de la méthode BWM

La méthode BWM comprend cinq étapes, [11]:

- Étape 1°: Déterminer un ensemble de critères de décision.
- Étape 2°: Déterminer le meilleur (par exemple, le plus souhaitable, le plus important) et le pire (le moins souhaitable, le moins important) des critères par le décideur. Dans cette étape, aucune comparaison n'est faite.

- Étape 3°: Déterminer la préférence du meilleur critère sur tous les autres en utilisant un nombre compris entre 1 et 9. Le vecteur Meilleur serait :

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, a_{BI}, a_{Bn}), \quad (1)$$

où  $a_{BI}$ , indique la préférence du meilleur critère  $B$  sur le critère  $I$ . Il est clair que  $a_{BB} = 1$ .

- Étape 4°: Déterminer la préférence de tous les critères sur le pire critère en utilisant un nombre compris entre 1 et 9. Le vecteur Autres vers le Pire résultant serait :

$$A_W = (a_{W1}, a_{W2}, a_{WI}, a_{Wn}), \quad (2)$$

où  $a_{IW}$ , indique la préférence du critère  $I$  sur le pire critère  $W$ . Il est clair que  $a_{WW} = 1$ .

- Étape 5°: Trouvez les poids optimaux ( $W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*$ )

Le problème peut être transféré au problème suivant:  
Min  $\xi$  avec les sous contraintes s/c :

$$|W_B - a_{BI}W_I| \leq \xi, \text{ pour tout } I \quad (3)$$

$$|W_I - a_{IW}W_W| \leq \xi, \text{ pour tout } I \quad (4)$$

$$\sum_I W_I = 1 \quad (5)$$

$$W_I \geq 0, \text{ pour tout } I. \quad (6)$$

Sachant que :

$W_B$  : le meilleur critère  $B$  sur  $I$ ,  $W_I$  : le pire critère sur  $W$ ,  $a_{BI}$  : la préférence du meilleur critère  $B$  sur le critère  $I$ ,  $a_{IW}$  : la préférence du critère  $I$  sur le pire critère  $W$ .

En résolvant le problème, les poids optimaux ( $W_1^*, W_2^*, \dots, W_I^*$ ) et  $\xi^*$  sont obtenus.

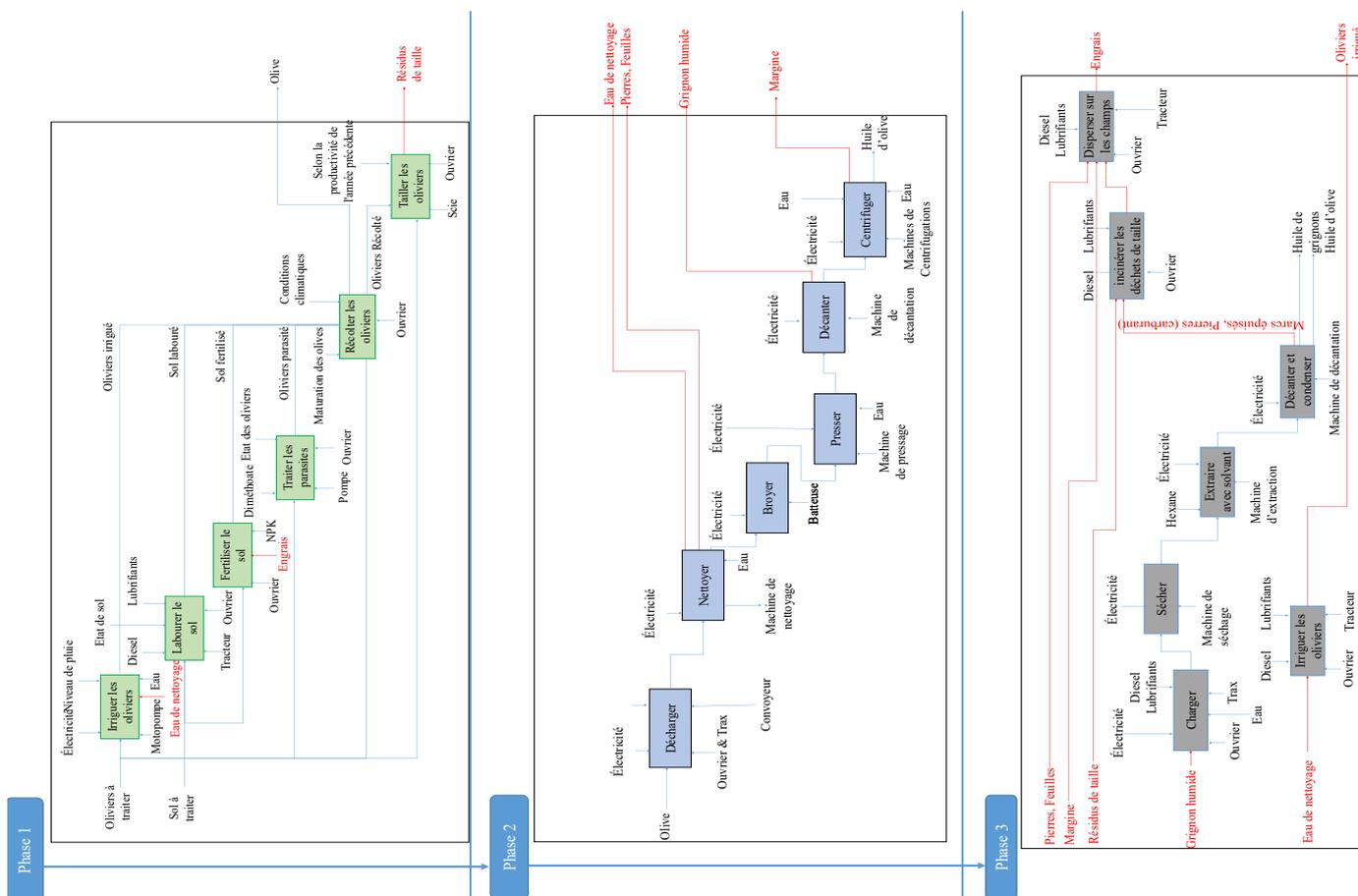


Figure 2 : Cycle de vie d'huile d'olive avec SADT

### 3.2. Classement des alternatives à partir de la méthode VIKOR

Les étapes de la méthodologie VIKOR sont décrites ci-dessous :

- Étape 1°: Construction de la matrice de décision, les valeurs quantitatives des critères sélectionnés

(indicateurs environnementaux, économiques et sociales) sont exprimées sous forme de matrice.

Étape 2°: Détermination des meilleures ( $f_i^*$ ) et des pires ( $f_i^-$ ) valeurs pour chaque  $C_i$ . Par conséquent, les équations (7) et (8) sont utilisées comme suit :

Si la fonction de critère est un bénéfice  

$$f_i^* = \max f_{ij} ; f_i^- = \min f_{ij} \quad (7)$$

Si la fonction de critère est un coût  

$$f_i^* = \min f_{ij} ; f_i^- = \max f_{ij} \quad (8)$$

Étape 3°: Dans le but d'élaboration de la distance des alternatives à la solution idéale, il faut calculer les indices  $S_j$  (group utility values) dans l'équation (9) et  $R_j$  (individual regrets) dans l'équation (10).

Le premier  $S_k$  représente la distance d'une alternative à une solution idéale positive, tandis que le second  $R_k$  représente la distance d'une alternative à une solution idéale négative.

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^n W_i^* (f_i^* - f_{i,j})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (9)$$

$$R_j = \max_i \left[ W_i^* \left( \frac{f_i^* - f_{i,j}}{f_i^* - f_i^-} \right) \right] \quad (10)$$

Étape 4°: Puis le calcul de  $Q_j$  dans l'équation (11) représente l'indice synthétique VIKOR. La valeur la plus basse de  $Q_j$  correspond au meilleur scénario qui est le plus proche de la valeur idéale,  $\vartheta$  représente le poids de l'alternative avec l'utilité maximale et normalement est égal à 0,5.

$$Q_j = \vartheta \frac{(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - \vartheta) \frac{(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (11)$$

Étape 5°: Quand  $\vartheta=0,5 \rightarrow$  les deux conditions doivent être remplies :

- Condition 1°:  $(Q(A_2) - Q(A_1)) \geq (1 / (n-1)) \quad (12)$

Sachant que :

$n^\circ$ : nombres des alternatives,  $A_1$ : meilleure alternative dans la liste de classement,  $A_2$ : la deuxième meilleure alternative dans la liste de classement.

- Condition 2°:  $A_1$  doit également être la mieux classée par S ou / et R.

Après ces deux conditions, VIKOR peut classer les alternatives pour déterminer rapidement le meilleur scénario avec précision.

## 4. ETUDE DE CAS DE LA PRODUCTION D'HUILE D'OLIVE

Afin d'illustrer notre méthodologie MCDA, présenté à la figure 1, pour la prise de décision sur la sélection du meilleur scénario pour le cycle de vie d'huile d'olive dans le contexte de la Tunisie, un cas concret illustratif est présenté. Ce cas concerne les pratiques agricoles, la méthode de transformation et la gestion de valorisation des déchets.

### 4.1. Les alternatives proposées par des décideurs de « terrain »

Huit scénarii ont été extraits de la littérature scientifique à partir des études de terrain avec les décideurs (agriculteurs, moulins, l'état, ...). Ces scénarii sont validés par les experts des Instituts De L'olivier de

Sfax. Chaque scénario comporte un cycle de vie complet d'huile d'olive (Tableau 1). Ce tableau représente les situations les plus répandues dans la chaîne de production locale, y compris les trois principales phases de la chaîne oléicole : la culture agricole, la production d'huile d'olive et le traitement des déchets.

### 4.2. Les critères de durabilité (ADCV)

L'évaluation des performances, environnemental, économique et social, est basée sur la compréhension et les connaissances des multiples parties prenantes acquises grâce aux statistiques et aux nos enquêtes.

Tableau 1 : Description des scénarii

Processus	Scénarii (Densité entre 17 et 34 Olivier /ha)									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8		
Phase d'agriculture	Pratiques agricoles	Conventionnel				Organique				
	Productivité	900 kg/ha		2160 kg/ha		1660 kg/ha		850 kg/ha		
	Irrigation	Sèche		Avec irrigation			Sèche			
	Gest des sols	Mécanique avec utilisation des machines								
	Taille	Manuel avec des scies								
	Récolte	Manuel avec des ouvriers								
	Fertilisation	Distribution du fumier et l'eau usées des moulins avec NPK et sur le sol		Fumier et compost de grignan humide		Compost de grignan humide et eaux usées des moulins		Fumier et compost de grignan humide		Compost de grignan humide et eaux usées des moulins
	Pesticide, herbicide	Manuel, deux fois par an, avec des insecticides				Rien				
	Phase de production	Méthode d'extraction	Système Traditionnel	Système à 3 phases	Système Traditionnel	Système à 3 phases	Système de centrifugation à 2 phases			
Grignan		2 <sup>ème</sup> extraction d'huile		Rien						
Phase de Gestion des Déchets	Grignan humide	Rien			Compostage de grignan avec fumier	Compostage de grignan humide avec des eaux usées des moulins	Compostage de grignan avec fumier	Compostage des eaux usées des moulins avec de grignan humide		
	Les eaux usées des moulins	Application des eaux usées des moulins directe sur les champs				Application des eaux usées sur les champs		Application des eaux usées sur les champs		
	Traitement des résidus de taille	Broyage et dispersion sur les champs	Brûlage et dispersion sur les champs	Broyage et dispersion sur les champs			Brûlage et dispersion des cendres sur les champs			

#### 4.2.1. Analyse environnementale du Cycle de Vie

Les décideurs et les experts, ont sélectionné les méthodologies qui leur conviennent, y compris la caractérisation CML 2 et les méthodologies ReCiPe 2008, [12]. Trois catégories d'impact environnemental ont été obtenues, comme définies par la caractérisation CML 2 baseline 2000 V2.04: Global warm, Eutrophication et Acidification. Les résultats de cette partie ont été développés et analysés avec le logiciel SimaPro 7.2 [12], Figure 3.

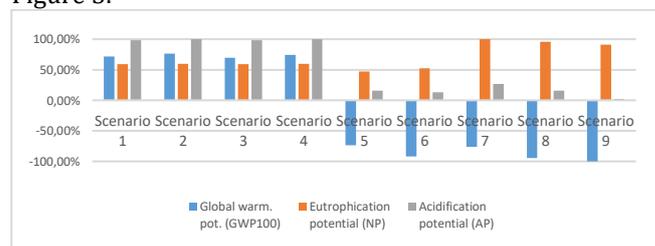


Figure3 : Impact environnemental de chaque scénario

Une comparaison entre les huit scénarii par unité fonctionnelle est réalisée (1000 kg d'olives). Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 3 et montrent, d'une manière générale, les scénarii conventionnels (Scénario 1, 2, 3 et 4) présentant les charges environnementales les plus élevées pour chaque catégorie d'impact étudié, tandis que les scénarii organiques (Scénario 5, 6, 7 et 8) présentent des charges environnementales négatives, donc moins polluants.

#### 4.2.2. Analyse du coût du cycle de vie

Dans cette étude les décideurs et les experts ont sélectionné des critères économiques comme : coût d'opération et productivité. Les résultats de cette partie ont été développés avec des enquêtes et des entretiens avec les parties prenantes. La figure 4 présente les impacts économiques de chaque scénario, les scénarii 5 et 6 présentent les charges économiques les plus élevés, cela est dû au type d'investissement dans la phase de transformation (Système de centrifugation à 2 phases). Cette technique est considérée comme une technique durable puisque elle ne nécessite pas d'une grande quantité d'eau, mais elle reste très coûteuse.

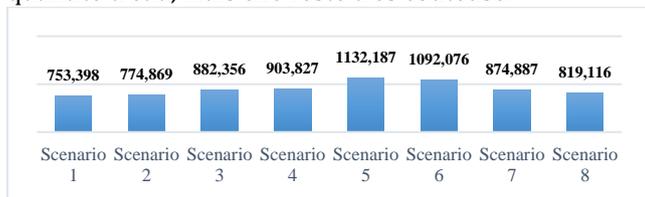


Figure 4: Impact économique de chaque scénario

#### 4.2.3. Analyse sociale du cycle de vie

Les enquêtes menées auprès des décideurs et des experts ont permis d'identifier les critères sociaux comme: Travailleurs (Le respect des droits humains au travail) et Les conditions de travail. Les résultats de cette partie ont été développés avec des enquêtes et des entretiens avec les parties prenantes. Dans notre enquête, une échelle de Likert dispose de 5 points pour exprimer le degré d'accord ou de désaccord relatif à une affirmation. Les droits humains et les conditions de travail sont moins respectés dans les scénarii S3, S4, S5 et S6, cela est lié à la productivité dans ces scénarii qui est la plus grande, (Figure 5). Ces scénarii ont besoin de plus d'effort physique.

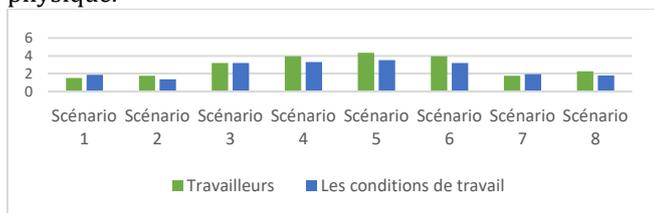


Figure 5: Impact social de chaque scénario

### 4.3. Calcul des poids des critères à partir de la méthode BWM

La méthode BWM a été réalisée pour obtenir le poids de chaque critère, en appliquant les équations (3), (4), (5)

et (6). Le tableau 2 représente les poids des critères dans notre étude de cas.

Tableau 2 : Matrice des poids des trois critères

Critères	Sous-Critères	Poids des Sous-Critères	Poids des Critères
AeCV	Global warm	0,323	0,710
	Eutrophication	0,194	
	Acidification	0,194	
AcCV	Coût d'opération (DT)	0,097	0,194
	Productivité (Kg)	0,097	
AsCV	Travailleurs	0,032	0,097
	Les conditions de travail	0,065	

### 4.4. Classement des alternatives à partir de la méthode VIKOR

Après avoir obtenu la matrice décisionnelle, présentée dans le tableau 3, la méthode VIKOR peut être appliquée pour évaluer le classement des 8 scénarii afin d'obtenir la meilleure solution de compromis. Les résultats du calcul VIKOR sont illustrés dans le tableau 4.

Tableau 3 : La matrice décisionnelle de notre enquête

Sous-critères		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
AeCV	Global warm	4,8E+02	5,1E+02	4,7E+02	5,0E+02	-4,9E+02	-6,1E+02	-5,1E+02	-6,3E+02
	Eutrophication	4,4E+01	4,5E+01	4,4E+01	4,5E+01	3,5E+01	3,9E+01	7,5E+01	7,2E+01
	Acidification	1,1E+01	1,1E+01	1,1E+01	1,1E+01	4,0E+00	1,4E+00	2,9E+00	1,7E+00
AcCV	Coût d'opération (DT)	753,398	774,869	882,356	903,827	1232,18	1092,07	874,887	819,116
	Productivité (Kg)	900	900	2160	2160	1740	1660	850	850
AsCV	Travailleurs	1,5	1,75	3,19	3,94	4,35	3,94	1,75	2,25
	Les conditions de travail	1,875	1,375	3,19	3,31	3,51	3,19	1,94	1,81

Tableau 4 : Résultats d'évaluation VIKOR et tri

	$S_{j, Eq(9)}$	$R_{j, Eq(10)}$	$Q_{j, Eq(11)}$	Classement
S1	0,3297	0,1570	0,9631	6
S2	0,3324	0,1613	0,9856	7
S3	0,3242	0,1556	0,9457	5
S4	0,3391	0,1599	0,9944	8
S5	0,1583	0,0484	0,1672	2
S6	0,1064	0,0342	0,0000	1
S7	0,1995	0,0968	0,4461	4
S8	0,1584	0,0895	0,3292	3

Sur la base des résultats présentés dans le tableau 4, on peut observer que le scénario 6 est le mieux classé selon la valeur  $Q_j$  (c'est-à-dire la valeur minimale) calculé grâce à l'équation (11).

Puisque  $\vartheta=0,5 \rightarrow$  Les deux conditions de l'étape 5 ont été examinées, sur la base du classement des différents scénarii. La conditions 1: d'après l'équation (12)  $\rightarrow Q(S6)-Q(S5) = 0,1672 > 1/(8-1) = 0,143$ . La condition 2: cette alternative est la mieux classée par S et R. Ces deux conditions sont satisfaisantes donc le classement de la méthode VIKOR est pertinent.

Le scénario 4 a le cycle de vie la moins durable, principalement pour deux raisons : 1) la transformation d'huile d'olive est basée sur un Système de centrifugation triphasé qui est considéré comme un système d'extraction polluant. 2) La valorisation des déchets: comprend une 2ème extraction d'huile de grignon qui nécessite plus d'eau + l'application des eaux usées des moulins directe dans les champs qui est considéré très polluant + Brûlure et dispersion des cendres sur les champs qui est considéré d'après les experts très polluant. Ces deux raisons ont

causé à la fois une grave pollution de l'environnement et des coûts économiques importants. Le scénario 6 est comparativement meilleur que les autres scénarii, particulièrement performant sur les plans environnemental, économique et sociale.

## 5. DISCUSSION

### 5.1. Analyse de sensibilité pour les poids des critères

Une analyse de sensibilité est menée en attribuant différents vecteurs de poids aux critères, selon 4 cas: Importance égale : attribuer un poids égal de 0.333 à chacun des trois critères (cas 1).

Un dominant avec le reste d'égale importance (cas 2, cas 3 et cas 4) : cela signifie qu'un poids dominant est attribué à un critère et qu'un poids égal est attribué aux 2 critères restants. En prenant le cas 2 comme exemple (tableau 5), un poids dominant de 0,40 est attribué aux impacts environnementaux et un poids de 0,30 est attribué à chacun des deux autres critères (économique et sociale). D'après les résultats présentés dans le tableau 5, le scénario 6 est le plus durable et scénario 4 est le pire dans les quatre cas. Par conséquent, on peut conclure que la méthode proposée pour calculer les poids des critères est valide en termes de sensibilité.

**Tableau 5 : Résultats de l'analyse de sensibilité en modifiant les poids des critères**

Poids :			Cas :	Scénarii							
Env	Eco	Soc		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
0.33	0.33	0.33	Cas 1	5	4	2	8	7	1	6	3
0.40	0.30	0.30	Cas 2	5	4	2	8	7	1	6	3
0.30	0.40	0.30	Cas 3	6	5	2	8	3	1	7	4
0.30	0.30	0.40	Cas 4	3	2	6	8	7	1	4	5

### 5.2. Analyse de robustesse

La méthode TOPSIS dans cette étude, a été menée pour vérifier l'évaluation des performances de l'analyse VIKOR. Les coefficients de classement, calculés, antérieurement par la méthode TOPSIS, pour les 8 scénarii sont : (S1=0.159, S2=0.155, S3=0.174, S4=0.165, S5=0,829, S6=0.910, S7=0.775 et S8=0.819). À partir des résultats du modèle d'évaluation complet, la séquence de cycles de vie d'huile d'olives, de la meilleure à la pire, a été dérivée comme suit : Scénario 6 (meilleur), Scénario 5, Scénario 8, Scénario 7, Scénario 3, Scénario 4, Scénario 1, Scénario 2 (pire). L'ordre des quatre primaires solutions obtenu par les deux méthodes (TOPSIS et VIKOR) est similaire. Par conséquent, on peut conclure que la méthode proposée pour le classement des alternatives est valide en termes de robustesse.

## 6. CONCLUSION

ADMC et ADCV sont intégrés pour l'évaluation de la durabilité des pratiques agricoles, la méthode de transformation et la gestion de valorisation des déchets,

pour que toutes les étapes de cycle de vie de la chaîne oléicole soient circulaires et durables. La méthode proposée permet aux décideurs/acteurs d'identifier les scénarii les plus durables pour atteindre leurs objectifs parmi différentes alternatives. Les méthodes BWM et VIKOR sont combinées pour déterminer la séquence durable et le scénario le plus durable. BWM est utilisé pour calculer les pondérations des critères pour l'évaluation de la durabilité. VIKOR est utilisé comme méthode multicritère pour classer les alternatives par ordre décroissant selon la matrice décisionnelle.

Le scénario 6 propose un cycle de vie qui implique la culture biologique de l'olivier avec irrigation. Cette configuration permet d'obtenir une productivité maximale grâce à un système d'irrigation efficace [12]. Selon l'étude de Jallali [10], le système d'extraction le plus durable est le système de centrifugation à 2 phases. En ce qui concerne la gestion des déchets, nos résultats concordent avec les travaux de [5]. Notre contribution est d'avoir intégré tous ces résultats dans un seul cas d'étude grâce à un cycle de vie complet.

## RÉFÉRENCES

- [1] Struik P C., Kuyper T W., Brussaard L., Leeuwis C. Deconstructing and unpacking scientific controversies in intensification and sustainability: why the tensions in concepts and values?. *Curr Opin Environ Sustain*, 8: 80–88, 2014.
- [2] Roy P., Nei D., Orikasa T., Okadome Q Xu H., Nakamura N., Shiina T. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *J Food Eng*, 90: 1–10, 2009.
- [3] De Luca A I., Iofrida N., Leskinen P., Stillitano T., Falcone G., Strano A., Gulisano G. Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review. *Science of the Total Environment*, 595: 352–370, 2017.
- [4] Keskes M A., Zouari A., Lehyani F., Houssin R. Circular economy implementation within manufacturing companies at sfax-tunisia: barriers and opportunities. *Environ Eng MANAG J (EEMJ)*, 21(3): 517-528, 2022.
- [5] Batuecas E., Tommasi T., Battista F., Negro V., Sonetti G., Viotti P., Fino D., Mancini G. Life Cycle Assessment of waste disposal from olive oil production: Anaerobic digestion and conventional disposal on soil. *J Environ Manage*, 237: 94–102, 2019.
- [6] Ren J., Toniolo S. Life cycle sustainability decision-support framework for ranking of hydrogen production pathways under uncertainties: An interval multi-criteria decision making approach. *J Clean Prod*, 175: 222–236, 2018.
- [7] Riesgo L., Gallego-Ayala J. Multicriteria Analysis of Olive Farms Sustainability: An Application of TOPSIS Models. *Handbook of Operations Research in Agriculture and the Agri-Food Industry*, 224: 327–353, 2015.
- [8] G.M. Cappelletti, L. Grilli, G.M. Nicoletti, and C. Russo. Innovations in the olive oil sector: A fuzzy multicriteria approach. *J Clean Prod*, 159, 95–105 (2017).
- [9] De Luca A I., Iofrida N., Falcone G., T. Stillitano T., Gulisano G. Olive growing scenarios of soil management: Integrating environmental, economic and social indicators from a life-cycle perspective, in: *Acta Hort. Intel Soci Horticultural Sci*, 1199: 209–214, 2018.
- [10] Jellali A., Hachicha W., Aljuaid A.M. Sustainable Configuration of the Tunisian Olive Oil Supply Chain Using a Fuzzy TOPSIS-Based Approach. *Sustainability*, 13: 1–20, 2021.
- [11] Rezaei J. Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method. *Omega*, 53: 49–57, 2015.
- [12] Salomone R., Ioppolo G. Environmental impacts of olive oil production: a Life Cycle Assessment case study in the province of Messina (Sicily). *J Clean Prod*, 28: 88–100, 2012.

# Proposition d'une méthodologie de conception collaborative de logiciel d'écoconception – Cas de la filière voile de compétition en Bretagne

L. Jacquet <sup>a,\*</sup>, C. Dufour <sup>b</sup>, Y. Macé<sup>b</sup>, A. Le Duigou<sup>c</sup>, O. Kerbrat <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univ Rennes, ENS Rennes, CNRS, GeM - UMR 6183, F-35000 Rennes, France

<sup>b</sup> Univ Rennes, ENS Rennes, F-35000 Rennes, France

<sup>c</sup> Université de Bretagne Sud, IRDL UMR CNRS 6027, Bionics group, Centre de recherche C Huygens, 56100 Lorient, France

\* e-mail : lucas.jacquet@ens-rennes.fr

## 1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Depuis plusieurs années, des problématiques environnementales comme la perturbation climatique émergent [1]. Ces problématiques environnementales créent des pressions socio-économiques sur la société et sont engendrées en grande partie par les activités industrielles. Tous les secteurs sont concernés et celui de la voile de compétition n'y échappe pas.

Au sein de ce secteur, de nouvelles jauges de classe de l'International Monohull Open Class Association (IMOCA) imposent aux voiliers neufs de « *Mettre en œuvre une analyse du cycle de vie (ACV) pour dresser un bilan carbone* » de ces derniers [2]. Ces recommandations sont intéressantes mais ne permettent pas d'exploiter le potentiel multicritère de l'outil ACV. En effet, cet outil normé est utilisé pour quantifier les multiples impacts potentiels sur des versions de système en cours de conception ou de développement [3], [4]. Cet outil est généralement utilisé au sein d'une démarche d'écoconception, lorsqu'une quantification d'indicateurs environnementaux est nécessaire. Des guides européens émettent des propositions afin de rendre les directives des normes opérationnalisables. Ce sont les guides International Life Cycle Data system (ILCD), publié en 2010 [5], et Product Environmental Footprint (PEF) publié en 2012 [6]. Les industriels de la filière voile de compétition en Bretagne ont émis un intérêt envers une démarche d'écoconception, basée sur l'outil ACV. De ce contexte est né un projet visant à réduire l'empreinte environnementale du secteur considéré : EcoSailingDesign®.

La filière voile de compétition en Bretagne est composée d'une multitude de petites et moyennes entreprises (PME), avec en moyenne une dizaine de personnes par entreprise. En effet, cette dernière regroupe environ 2350 emplois au sein de 210

entreprises. Ces entreprises manquent généralement d'expertise en écoconception [7]. De plus, ce sont des entreprises artisanales pour la plupart, composées principalement d'ateliers plutôt que de bureaux (17 % d'entreprises conception, expertises contre 60 % d'entreprises production, entretien, réparation, maintenance). Ces deux aspects compliquent l'introduction des considérations environnementales au sein des entreprises. Il est proposé, au travers d'EcoSailingDesign®, de développer un logiciel d'écoconception à destination de la filière, basé sur l'outil ACV. Ce logiciel sera accompagné d'une base de données environnementale spécifique, afin de faciliter les analyses à l'échelle des process et du voilier dans son ensemble. Du fait d'un manque de connaissances spécifiques en écoconception de la part des entreprises, le développement du logiciel est fait à partir d'un besoin méconnu par les futurs utilisateurs.

Actuellement, on observe un manque d'intégration et d'appropriation des outils d'écoconception en entreprise, notamment dû à un manque de praticité des outils [8]. De plus, pour qu'un outil d'écoconception soit utilisé de façon efficace par les acteurs de la conception, il faut qu'il s'adapte aux contraintes de ces derniers [9].

Les approches participatives permettent de mieux prendre en compte l'utilité du produit conçu dès la phase de conception [10]. Elles permettent aussi de faire remonter des besoins latents au long du processus de conception pour proposer un produit qui répond au mieux aux exigences utilisateur. Aussi, les futurs utilisateurs peuvent développer des compétences techniques pendant l'avancée de la conception collaborative. Enfin, au long du processus de mise en place d'analyse de cycle de vie, une multitude d'hypothèses (relatives notamment à l'unité fonctionnelle (UF), au périmètre de l'étude, aux méthodes de calculs des

impacts) doivent être émises. Pour que celles-ci soient pertinentes, il est conseillé dans les guides européens de les proposer en relation avec les industriels [5]. Il est entièrement pertinent de développer une méthodologie de conception basée sur une approche participative pour trois raisons :

- Les futurs utilisateurs non formés aux méthodologies d'écoconception pourront développer des compétences techniques dans ce domaine et exprimer des besoins de plus en plus précis au long de la conception participative ;
- Via les hypothèses émises et les choix collaboratifs, il sera possible de faire monter en compétence les industriels concernant la méthodologie ACV et de mieux s'appropriier les futurs outils ;
- La prise en compte des contraintes utilisateurs pourra se faire tout au long du processus de conception.

L'objectif de notre étude est de présenter le travail collaboratif mené sur deux points méthodologiques : l'unité fonctionnelle et le choix d'un logiciel ACV. Ces aspects sont liés à l'outil ACV, qui sera utilisé dans un outil d'écoconception, créé au travers d'une méthodologie de conception collaborative qui est présentée dans cet article. Le travail sur la méthodologie de conception collaborative est hors du cadre de cet article.

Après présentation du contexte et de la problématique, nous présentons la méthodologie de conception participative d'un logiciel d'écoconception. Les sections suivantes présentent les différentes étapes de la méthodologie, puis un focus est fait sur deux choix relatifs à la méthodologie ACV à mettre en place pour la filière voile de compétition.

## 2. METHODOLOGIE DE CONCEPTION COLLABORATIVE PROPOSEE

A notre connaissance, il n'existe pas de littérature traitant de conception collaborative de logiciel d'écoconception : une méthodologie de conception participative de logiciel a donc été adaptée et présentée Figure 1. Cette méthodologie est adaptée des travaux de Loup-Escande [11] à laquelle des étapes propres à l'ACV sont ajoutées (étapes 0, I, II, XIII, en rouge sur la figure). La méthodologie mise en place découle d'un besoin d'outil d'écoconception, basé sur l'outil ACV, pour la filière voile de compétition en Bretagne. Des choix collaboratifs ont lieu concernant les aspects ACV et logiciel écoconception, lors de la phase de conception de logiciel, entre les acteurs académiques et industriels. La partie gauche de la figure est relative aux choix méthodologiques liés à l'ACV des études et celle de droite est liée aux choix liés à l'outil d'écoconception qui sera développé.

La première étape consiste en un travail aboutissant à la mise en place d'hypothèses de modélisation ACV à implémenter dans le logiciel. La détermination de ces hypothèses se base sur un état de l'art (étape I) des études précédemment menées dans le secteur considéré. Les différentes hypothèses clés de modélisation ACV sont ensuite déterminées (étape II) en relation avec les industriels, ces derniers étant accompagnés par un travail de montée en compétences afin qu'ils s'approprient les notions en question (notion de « co-choix »). Ces hypothèses clés sont à comprendre dans le sens où les choix faits les concernant ont un impact fort sur la fiabilité et comparabilité des études. Par exemple, le choix d'unité fonctionnelle influence fortement les résultats de l'étude, et deux études avec des unités fonctionnelles différentes ne sont pas comparables.

De ces travaux de co-choix d'hypothèses ACV, il est possible d'analyser le besoin des futurs utilisateurs (étape III). Les éléments liés à cette étape traités dans cet article sont présentés en gras. Des contraintes liées à ce besoin sont ensuite déterminées (étape IV).

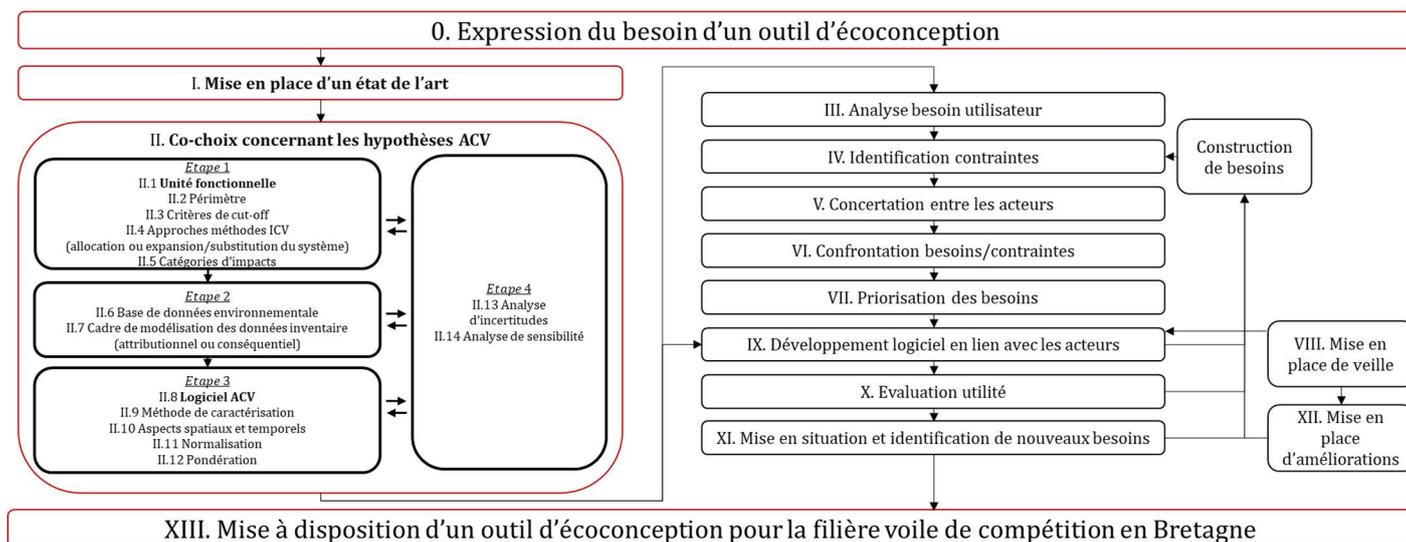


Figure 1 Méthodologie de conception collaborative de logiciel d'écoconception proposée, adaptée de Loup-Escande [11]

Une concertation entre les différents acteurs a lieu (étape V) afin de confronter les besoins et leurs contraintes (étape VI), puis d'effectuer une priorisation des besoins (étape VII).

En parallèle est menée une veille envers les différents logiciels d'écoconception existants (étape VIII), qui aboutira à un développement logiciel en lien avec les acteurs de la filière (étape IX). Ce développement est alimenté par les hypothèses ACV choisies de concert avec les entreprises. L'utilité du logiciel est ensuite évaluée (étape X) au regard des besoins précédemment exprimés à l'étape VII. Enfin, une mise en situation réelle est attendue (étape XI), avec en parallèle des améliorations implémentées dans le logiciel (étape XII) sur la base de la veille effectuée à l'étape VIII.

Les étapes IX, X, XI et XII peuvent mener à l'émergence de nouveaux besoins, auquel cas le processus de conception est amené à revenir à l'étape IV.

L'objectif final est d'aboutir à un outil fonctionnel et utilisable pour la filière voile de compétition, répondant au mieux à la fois aux exigences industrielles et environnementales.

### 3. METHODOLOGIE ETAPE I : ETAT DE L'ART

Un état de l'art des outils et initiatives industrielles relatifs aux analyses environnementales propres à la voile de compétition est effectué, mais aucun article scientifique académique n'a été relevé. Une analyse élargie au nautisme a donc été performée.

#### 3.1. Voile de compétition

Concernant la voile de compétition, un outil web d'ACV simplifié a été développé en collaboration entre l'équipe de course *11<sup>th</sup> Hour racing* et le groupe Anthesis : Marine Shift 360 (MS360) [12]. L'outil permet de calculer 6 indicateurs environnementaux. Ce dernier a pour avantage d'être simple d'utilisation et de proposer une structure adaptée aux industriels du milieu du nautisme. Néanmoins, ce dernier agit comme une « boîte noire ». Les hypothèses de modélisation des données sont difficilement accessibles, entravant l'analyse de la fiabilité des résultats.

A notre connaissance, cinq études ont été mises en place dans le secteur de la voile de compétition :

- Une ACV datant de 2010 commandée par Multi One Design à un cabinet extérieur (Quantis) a été performée sur un Mod70 ;
- Un bilan environnemental a été mené sur l'IMOCA de Roland Jourdain (*Veolia*) en 2010 ;
- Arthur le Vaillant a fait réaliser une empreinte carbone sur son class40 *Leyton* en 2018 par le cabinet de consulting E6 ;
- En 2020 Stéphane le Diraison a mis en place des pistes d'écoconception sur son IMOCA *Time for Oceans*, probablement avec un bilan carbone ;

- L'équipe de course *11<sup>th</sup> Hour racing* a mis en place une ACV par an en 2019, 2020 et 2021 sur l'IMOCA portant le même nom. L'analyse a été performée en interne avec le logiciel MS360.

On observe donc que la filière voile de compétition est en mouvement depuis quelques années concernant les questions environnementales, mais qu'une diversité d'approches est mise en place au regard des outils d'analyse et des types de voiliers considérés, de façon plus ou moins transparente. De plus, le fait de déléguer ces travaux à des entités extérieures freine l'appropriation des résultats ACV aux acteurs commanditaires. Au sein de la filière, une confusion peut avoir lieu entre écoconception et ACV, qui a nécessité des actions de montée de compétences. Afin de rendre les études comparables et fiables, il serait pertinent de proposer un outil commun de quantification des impacts pour chaque type de voilier, pour le secteur de la voile de compétition dans son ensemble. Ce point a déjà trouvé réponse chez la classe IMOCA qui impose de faire une ACV. Une fois que l'outil de quantification est imposé, il faut pouvoir proposer des règles de modélisation propres à chaque type de voilier afin de rendre les études comparables et fiables.

Il a été décidé de réaliser un état de l'art des ACV mises en place dans le nautisme afin de proposer des règles de modélisation transparentes et justifiées pour la filière voile de compétition.

#### 3.2. Nautisme

Une revue critique des publications relatives à l'ACV dans le domaine du nautisme a donc été réalisée. Plusieurs conclusions ont été tirées des 32 articles analysés et présentés aux acteurs de la filière voile de compétition.

Tout d'abord, certaines questions concernant les sujets clés de l'ACV devraient être abordées plus en détail afin de rendre les résultats de l'ACV fiables et comparables :

- Les UF's doivent être déterminées pour les différents types de bateaux ;
- Des limites complètes doivent être définies pour servir de base aux études futures et des règles de coupure doivent être définies concernant la précision prévue pour les impacts ;
- Des règles communes de modélisation de la multifonctionnalité doivent être déterminées concernant les flux de co-produits et les bateaux susceptibles de présenter plusieurs fonctions ;
- Les catégories d'impact à étudier pour les différents types de bateaux doivent être sélectionnées ;
- Le choix de la base de données doit être discuté, en particulier la spécificité à aborder si une base de données pour l'industrie maritime doit être créée ;

- Les choix de modélisation de l'Inventaire sur Cycle de Vie (ICV) doivent être discutés, en particulier la manière de modéliser l'approche conséquentielle dans l'industrie maritime ;
- Les spécificités d'un outil d'ACV dédié à l'industrie maritime doivent être abordés par la communauté scientifique, en ce qui concerne le public destiné à l'utiliser et ses besoins ;
- Les facteurs de caractérisation doivent être créés par des chercheurs pour les besoins du secteur maritime, en tenant compte de la distribution temporelle et spatiale des impacts locaux. Les facteurs de caractérisation concernant des impacts particuliers que sont le bruit sous-marin et l'introduction d'espèces exotiques pourraient également être développés, au regard des réglementations déjà existantes dans l'industrie nautique ;
- Les stratégies de gestion des incertitudes doivent également être abordées afin de faciliter l'analyse des incertitudes dans les études futures.

Pour aborder plusieurs de ces sujets (par exemple, les critères de coupure, la sélection des catégories d'impact), des études de référence complètes doivent être réalisées pour dériver des hypothèses. Les études futures utiliseront ces lignes directrices et ces outils pour réaliser facilement des études complètes. Une ligne directrice commune pourrait également contribuer à rendre les résultats fiables et comparables entre les études, rendant ainsi le processus de décision plus efficace et plus rapide.

A partir de ces efforts de recherche, des outils concrets sont développés pour aider à diffuser les analyses environnementales et leurs exploitations dans les entreprises du nautisme :

- Une base de données publique complète, transparente et fiable doit être créée pour aider à diffuser l'ACV dans l'industrie maritime. Cette base de données inclura des dimensions spatiales et temporelles, notamment en ce qui concerne la phase d'exploitation. Les données présentes dans cette base devraient être génériques afin de garantir la propriété intellectuelle des entreprises ;
- Un outil d'ACV public et transparent doit être créé à partir de la base de données et des facteurs de caractérisation pour aider à la prise de décision aux différentes étapes du cycle de vie d'un projet. Cet outil s'adaptera aux différents utilisateurs en fonction de leurs besoins en matière d'ACV et il disposera d'un module permettant d'évaluer facilement les résultats. Les hypothèses ACV incluses dans l'outil seront disponibles de façon ouverte.

## 4. METHODOLOGIE ETAPE II : RESULTATS DE CO-CONSTRUCTION DES PARAMETRES DE L'OUTIL

A partir de l'état de l'art réalisé, un travail est dérivé concernant chacun des différents concepts méthodologique clés de l'ACV.

Plusieurs possibilités sont envisageables afin de traiter ces hypothèses. Soit un travail collaboratif a lieu de façon chronologique car les hypothèses dépendent les unes des autres. Soit un travail collaboratif a lieu sur d'autres points qui peuvent être discutés indépendamment. Sinon, un travail explicatif peut avoir lieu au travers de formations car il ne nécessite pas de réflexion collaborative mais seulement une montée en compétence.

Un travail a eu lieu concernant la détermination de l'UF, qui est le premier point à traiter concernant les étapes chronologiques de travail collaboratif. La détermination d'un logiciel ACV adapté à la filière, quant à lui, peut être traité indépendamment. Le travail concernant l'UF est inclus dans les choix à traiter de façon méthodologique tandis que celui sur le logiciel ACV peut être traité en parallèle.

### 4.1. Méthodologie étape II.1 : focus sur le choix de l'unité fonctionnelle

L'UF est un choix majeur dans la mise en place d'une ACV car elle fixe les quantités de matières de l'étude. Les indicateurs environnementaux sont calculés au regard d'une fonction à remplir par un produit ou service (le flux de référence dérivé de l'UF). La façon de mettre en place le choix collaboratif est présentée en suivant la méthode proposée partie 4.

Selon le guide ILCD, l'UF doit répondre aux questions « Quoi ? », « Combien ? », « Comment ? » et « Pour combien de temps ? » [5]. Ce sont ces informations qui sont sélectionnées comme pertinentes à déterminer en collaboration avec les industriels.

Le concept d'UF ainsi que son importance est présenté aux industriels au travers d'un exemple type (l'UF d'un pot de peinture). Une UF proposée dans la littérature du nautisme leur est de plus présentée.

Le support proposé pour travailler sur l'UF avec les 12 industriels adhérents au projet collaboratif est un tableau, où les éléments importants relatifs à l'UF sont présentés, et les exemples précédemment proposés sont rappelés. Ce support est présenté Tableau 1 ainsi que l'UF qui est ressortie des échanges.

L'activité proposée pour déterminer une UF se déroule en plusieurs étapes de 5 minutes.

Tout d'abord, les industriels réfléchissent individuellement pour renseigner une UF sur le support proposé. Une fois cette réflexion faite, ils se regroupent par groupes de 3 afin de remplir un nouveau support. La confrontation collective d'idées individuelles est source de grande motivation dans les échanges au sein d'un groupe, permettant à l'issue des discussions d'aboutir à un consensus acceptable par tous. Cette étape est répétée par groupes de 6, puis finalement une discussion a lieu

avec les 12 industriels présents, avec un appui scientifique des chercheurs présents.

**Tableau 1 : Gabarit proposé aux industriels et proposition d'unité fonctionnelle suite à l'activité proposée**

Produit	Fonction	Ampleur	Critère de performance	Durée
Pot de peinture	Couvrir un mur	1 m <sup>2</sup>	Opacité 0.98	1 an
Bateau	Transport de passager	1 tonne sur 1 km	10 nœuds	1 an
<b>Voilier de compétition</b>	<b>Finir des courses</b>	<b>1 course</b>	<b>Vitesse moyenne cible</b>	<b>1 Campagne de course</b>

A l'issue de l'activité, une proposition d'UF faisant consensus est émise, elle est présentée à la dernière ligne du Tableau 1. A partir de cette proposition, un travail est mené du côté des chercheurs afin de faire une proposition pertinente au regard de la méthodologie ACV.

L'UF finalement proposée est : « Finir une course  $c$  avec une vitesse moyenne cible  $v_{cibmoy}$  (qui dépend de la course considérée) sur une durée de campagne (qui dépend de la course considérée) ».

L'UF ainsi fixée est paramétrable et permet de prendre en compte différentes conditions de navigation au travers du type de course et peut s'adapter à plusieurs types de voiliers de compétition. Elle permet en outre d'introduire la notion d'écoperformance, comme le ratio entre une vitesse moyenne cible (indicateur de « qualité » du produit considéré) et les impacts environnementaux (indicateurs « environnementaux »). L'équation (1) présente la logique derrière le terme d'écoperformance. On remarque qu'à iso-performance, l'écoperformance augmente si l'impact environnemental des voiliers diminue. De même, pour des impacts constants, si on a un système plus performant alors il est dit "écoperformant".

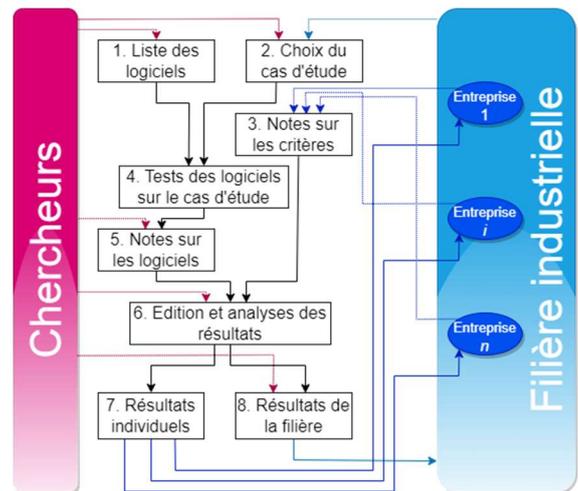
$$Ecoperformance = \frac{performances}{impacts\ environnementaux} \quad (1)$$

#### 4.2. Méthodologie étape II.8 : Focus sur le logiciel ACV avec benchmark collaboratif des outils ACV

Des outils ACV existent déjà et sont couramment utilisés dans d'autres secteurs industriels. Il convient d'en faire un benchmark, en appui avec les partenaires industriels de la filière, afin de déterminer lequel(lesquels) est(sont) le(s) plus pertinent(s) vis-à-vis du besoin et de la triple contrainte : coût (500 k€), délai (3 ans), périmètre (industriels de la Bretagne Sailing Valley®). En effet, les résultats d'une ACV sont souvent dépendants du logiciel utilisé et de ses fonctionnalités ([13], [14]). Nous avons donc mené un benchmark collaboratif des outils ACV existants.

Différents types d'outils d'analyse environnementale sont disponibles sur le marché :

- Des outils d'ACV industriellement utilisés, par exemple Simapro, Gabi, Umberto, EIME ou bien encore OpenLCA ;
- Des outils classiquement utilisés en conception qui peuvent faire des analyses environnementales : par exemple SolidWorks Sustainability, Granta EduPack ;
- Des outils dédiés à des filières : MS360 pour la classe de voiliers IMOCA, Elodie, Vizcab pour le bâtiment ;
- Des outils web et applications gratuits, par exemple EcoImpact Calculator, ActivityBrowser.



**Figure 2. Démarche de co-construction du choix de logiciel d'ACV pour une filière industrielle**

Ces outils ont un coût et nécessitent généralement une expertise pour être utilisés. Il faut donc en choisir un seul pour les industriels, qui ne vont pas pouvoir multiplier les ressources financières et humaines investies sur cet outil informatique ACV. Dans les comparaisons existantes ([15], [16]), les analyses n'incluent pas les utilisateurs et ne sont pas quantitatives. Nous avons donc créé une méthode d'analyse systématique de co-construction de choix de logiciel d'ACV pour une filière industrielle, représentée sur la Figure 2.

Elle est basée sur la méthode Analytic Hierarchy Process. Bien qu'une quantification soit nécessaire pour classer les logiciels existants, ce sont les notations relatives des solutions les unes par rapport aux autres qui vont être pertinentes. En ce sens, les comparaisons par paires de la méthode AHP sont bien appropriées. Les autres avantages de la méthode AHP qui ont été repris ici sont la simplicité et le fait que les entreprises se prononcent de façon individuelle (étape 3) sur les pondérations des critères. L'inconvénient en revanche est le temps de mise en place, mais néanmoins justifié dès lors qu'il s'agit d'un choix important pour toute une filière industrielle.

L'étape 1 consiste à définir les logiciels à tester. Nous nous sommes limités à 10 logiciels pour des questions de faisabilité. L'étape 2 consiste à définir le cas d'étude (Réalisation d'un moule de foil en composite) qui va servir

de base pour tester les fonctionnalités des logiciels. Lors de l'étape 3, neuf catégories de critères de comparaison ont été présentées aux entreprises et chacune s'est prononcée sur une comparaison par paires. Les catégories de critères sont les suivantes :

- Coût du logiciel ;
- Simplicité de prise en main ;
- Adaptabilité aux outils de l'entreprise ;
- Possibilité de travail collaboratif ;
- Qualité des données ;
- Simplicité de la modélisation ;
- Complétude de la modélisation ;
- Clarté et lisibilité des résultats ;
- Aide à l'interprétation des résultats.

L'étape 4 consiste à exploiter chaque logiciel pour réaliser le cas d'étude, ainsi qu'à relever toutes les fonctionnalités des logiciels, en se basant sur une grille comprenant 63 critères détaillés. La grille est disponible sur demande aux auteurs. L'étape 5 est une traduction des fonctionnalités des logiciels en note, sur chaque critère. Cela permet de s'affranchir de la subjectivité et d'avoir une comparaison quantifiée. A l'étape 6 sont regroupées les évaluations des logiciels et les pondérations issues des comparaisons par paires réalisées par les industriels. Il est alors possible de sortir des analyses individuelles des classements des logiciels pour chaque entreprise (étape 7) ou des analyses plus globales concernant toute la filière (étape 8).

## 5. CONCLUSIONS/PERSPECTIVES

Cet article se base sur une méthodologie de conception collaborative de logiciel d'écoconception et s'axe plus particulièrement sur les aspects relatifs à la mise en place de la démarche d'analyse environnementale qui y sera développée : l'unité fonctionnelle et le choix de logiciel ACV.

La méthodologie en 12 étapes a été présentée. Elle se veut exploitable pour co-construire des analyses environnementales et des outils d'écoconception pour différents cas industriels car les énoncés des étapes et leur enchaînement sont génériques. Le travail mené dans cet article concerne plus précisément les étapes I ; II.1 ; II.8 appliquées à la voile de compétition.

La première étape de la démarche, un état de l'art, a été présentée. La littérature scientifique académique concernant les analyses environnementales de la voile de compétition n'étant pas assez fournie, il a été nécessaire d'effectuer un état de l'art des ACV menées dans le nautisme en général. Plusieurs manques ont été identifiés par rapport aux guides européens et des pistes de recherche ont été présentées.

Au regard de ces suggestions, un travail est réalisé concernant les différents points méthodologiques clés des étapes de l'ACV. La méthodologie de travail envisagée pour traiter ces différents points est présentée.

Deux points méthodologiques fixés avec les industriels sont présentés : un travail sur une UF via un atelier et un travail sur le choix d'un logiciel ACV via un benchmark collaboratif. Ces différents travaux seront intégrés au sein du logiciel d'écoconception, via l'outil ACV.

Les autres points méthodologiques clés de l'ACV à implémenter vont être co-choisis dans l'année à venir.

## REMERCIEMENTS

Ce projet a reçu le soutien de la Région Bretagne – ARED 2020.

## RÉFÉRENCES

- [1] P. A. Arias *et al.*, "Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," 2021. doi: 10.1017/9781009157896.002.
- [2] *International Monohull Open Class Association - Règle de Classe 2025*, vol. 2. 2022, pp. 1–50.
- [3] ISO, "NF EN ISO 14040: Environmental management—life cycle assessment—Principles and framework," *Int. Organ. Stand.*, 2006.
- [4] ISO, "NF EN ISO14044 : Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines," *Int. Organ. Stand.*, 2006.
- [5] European commission, *ILCD Handbook - General guide on LCA - Detailed guidance*, vol. 15. 2010.
- [6] EC-JRC, "Product Environmental Footprint (PEF) Guide," *European Commission Jt. Res. Cent.*, p. 154, 2012, [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/footprint/PEF\\_methodology\\_final\\_draft.pdf](http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/footprint/PEF_methodology_final_draft.pdf).
- [7] S. Le Pochat, G. Bertoluci, and D. Froelich, "Integrating ecodesign by conducting changes in SMEs," *J. Clean. Prod.*, vol. 15, no. 7, pp. 671–680, 2007, doi: 10.1016/j.jclepro.2006.01.004.
- [8] M. Rio, T. Reyes, and L. Roucoules, "A framework for ecodesign : an interface between LCA and design process .," *Int. J. Eng.*, vol. 9, pp. 121–126, 2011.
- [9] V. A. Lofthouse, "Ecodesign tools for designers : Defining the requirements," *J. Clean. Prod.*, no. November, pp. 1386–1395, 2006, doi: 10.1016/j.jclepro.2005.11.013.
- [10] E. Loup-escande, J.-M. Burkhardt, and S. Richir, "Anticiper et évaluer l'utilité dans la conception ergonomique des technologies émergentes : une revue," *Trav. Hum.*, vol. 76, pp. 27–55, 2013, doi: 10.3917/th.761.0027.
- [11] E. Loup-escande, O. Christmann, F. Danglade, and S. Richir, "L'approche Living Lab : proposition et application d' une démarche méthodologique pour mieux prendre en compte les aspects humains dans la conception de produits logiciels," in *AIP PRIMECA*, 2012, no. March.
- [12] Marine Shift 360, "<https://marineshift360.org/>," 2022. .
- [13] R. Speck, S. Selke, R. Auras, and J. Fitzsimmons, "Life Cycle Assessment Software - Selection Can Impact Results," *J. Ind. Ecol.*, vol. 00, no. 0, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1111/jiec.12245.
- [14] I. T. Herrmann and A. Moltesen, "Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose ? - A comparative assessment of SimaPro and GaBi," *J. Clean. Prod.*, vol. 86, pp. 163–169, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.004.
- [15] A. P. Iswara *et al.*, "A Comparative Study of Life Cycle Impact Assessment using Different Software Programs," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 506, pp. 1–7, doi: 10.1088/1755-1315/506/1/012002.
- [16] D. SU, Z. Ren, and Y. WU, "Guidelines for Selection of Life Cycle Impact Assessment Software Tools," *Sustain. Prod. Dev. Springer, Cham.*, 2020, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39149-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39149-2_4).

# Une méthode, un langage et un environnement pour la modélisation et la résolution de problème de conception de système

Pierre-Alain. Yvars <sup>a,\*</sup>, Laurent. Zimmer <sup>a</sup>

<sup>a</sup> ISAE-Supméca, QUARTZ, 3 rue Fernand Hainaut, 93407 Saint Ouen Cedex, France

<sup>b</sup> Dassault Aviation, Direction de la Prospective, 78 quai Marcel Dassault, 92552 Saint Cloud, France

\* e-mail : pierre-alain.yvars@isae-supmeca.fr

## 1. INTRODUCTION

Le principe général usuel en matière de conception de systèmes consiste à proposer un système candidat, puis à évaluer ses performances et à les comparer aux exigences attendues. Si les exigences sont vérifiées alors le candidat est une solution sinon un nouveau candidat doit être proposé et le processus répété (cf. Figure 1). La méthode est itérative, dite de conception point à point, et l'on passe d'un candidat à l'autre jusqu'à trouver une solution valide, c'est-à-dire une solution qui vérifie toutes les exigences du cahier des charges. Les avantages et limites de cette vision de la conception ont été examinés dans [1, 2].

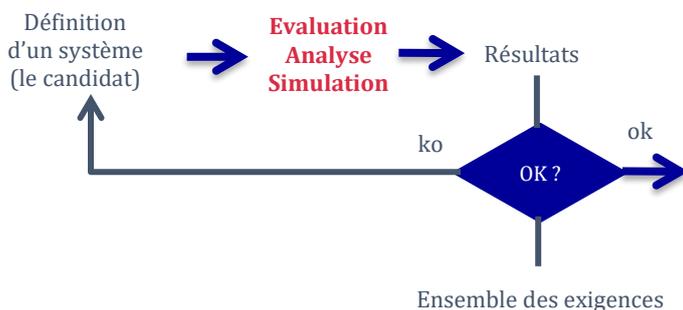


Figure 1 – Démarche usuelle de conception de système

A contrario, et face à un état de l'art dont les limites ont été détaillées dans [3], nous avons démarré en 2013 un travail de recherche visant à proposer une vision de la conception de système sous l'angle de la synthèse et basée sur des modèles. Les problèmes adressés relèvent du dimensionnement, de la configuration, de l'allocation/déploiement et de la génération d'architecture. Les types de systèmes considérés peuvent

être à dominante technologique (mécanique, électronique, génie électrique...), à dominante logiciel (système embarqué) ou bien encore des systèmes cyber physiques (CPS).

Nous présentons ici les résultats de notre démarche selon trois aspects : une vision méthodologique de la synthèse de système appelée MBSS (Model Based System Synthesis), un langage de représentation du problème (DEPS) ainsi qu'un environnement de modélisation et de résolution (DEPS Studio). Enfin nous éliciterons un ensemble de cas d'étude traités à l'aide du MBSS et destinés à alimenter et valider nos travaux. Ce papier est volontairement dédié à une vision synthétique des travaux réalisés. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à la bibliographie.

## 2. LE MBSS

### 2.1. Principes

Plusieurs principes de base caractérisent l'approche MBSS [2]:

- une approche "set based design" dans laquelle l'espace de conception est réduit au fur et à mesure que les exigences sont placées dans l'espace de conception
- la modélisation du problème de conception plutôt que la description d'un système candidat
- la prise en compte simultanée de plusieurs exigences hétérogènes
- l'utilisation des exigences pour réduire l'espace des solutions basées sur les exigences.

L'approche pour résoudre le problème est dite "par satisfaction des exigences" et non par "validation et vérification" puisqu'à tout moment nous essayons de

trouver des solutions dans les limites de l'espace de conception contraint par les exigences. Les solutions trouvées sont alors nécessairement correctes par construction (cf Figure 2). On tend alors vers un cycle en I de conception plutôt que vers un traditionnel cycle en V.

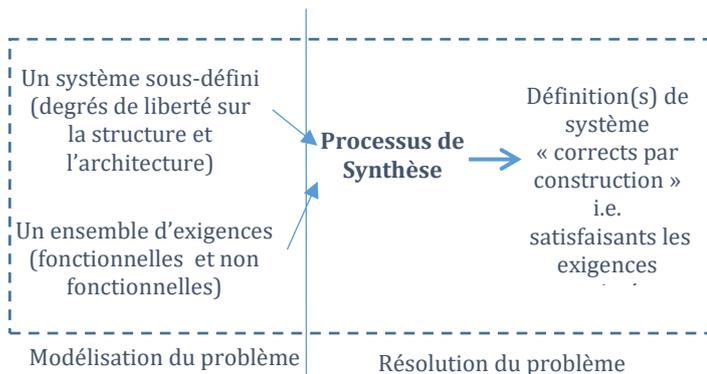


Figure 2 – Processus MBSS

### 2.1. Modéliser le problème au lieu de décrire le système

Un objet dont les valeurs des inconnues ne sont pas fixées a priori sera appelé un objet sous-défini.

La modélisation du problème nécessite un formalisme ayant les capacités suivantes de :

- modélisation d'une architecture sous-définie : les inconnues de l'architecture, leur domaine de valeurs possibles, les propriétés structurelles devant être satisfaites nécessairement par toute architecture de solution et la décomposition hiérarchique de l'architecture sous-définie

- modélisation d'un ensemble de comportements sous-définis : les inconnues comportementales, leur domaine de valeurs possibles, les propriétés comportementales et la décomposition hiérarchique des comportements

- partage de l'architecture sous-définie entre plusieurs comportements. En effet, une solution du problème sera une instanciation complète du modèle d'architecture satisfaisant l'union de tous les comportements exprimés

- définition des exigences : sous forme de propriétés structurelles et comportementales sur l'architecture sous-définie et les modèles de comportement.

De plus en raison de la diversité des problèmes de conception abordés :

- les inconnues doivent pouvoir prendre leurs valeurs dans des domaines mixtes : intervalles de nombres réels, intervalles d'entiers, énumérations de valeurs réelles, énumérations de valeurs entières

- les propriétés exprimées doivent pouvoir l'être sous forme d'équations et d'inégalités algébriques linéaires et non linéaires mais aussi sous forme de propriétés spécialisées telles que les valeurs à prendre dans les catalogues.

Les concepts énoncés ci-dessus apparaissent dans le méta-modèle MBSS de la figure 3.

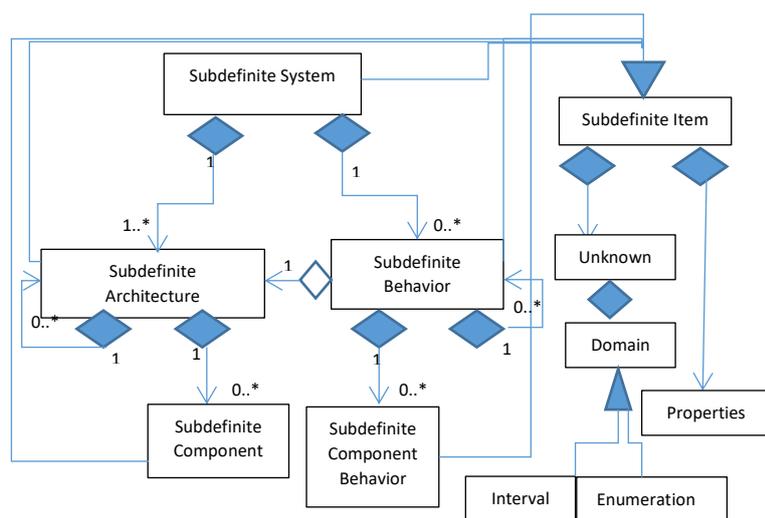


Figure 3 – Extrait du méta modèle MBSS [2]

### 3. LE LANGAGE DEPS

DEPS est un langage de modélisation textuel, déclaratif, structuré à base de modèle et de propriétés, offrant la possibilité de décrire une ontologie des quantités physiques et permettant la représentation des variables et des propriétés dans des domaines discrets et continus. En tant que langage déclaratif, DEPS offre à l'ingénieur la possibilité de décrire son problème de conception sans décrire la manière de le résoudre. A charge ensuite à un outillage dédié équipé d'un solveur générique de résoudre le problème [3-5].

#### 3.1. Ontologie pour ingénieur

Les données manipulées dans DEPS peuvent être :

- des valeurs entières ou réelle
- des intervalles entiers, des intervalles réels, des domaines énumérés entiers ou des domaines énumérés réels.

Si l'on s'en tient à ces types simples, on ne peut pas représenter les quantités manipulées par les concepteurs de systèmes techniques. C'est pourquoi nous avons proposé deux concepts pour représenter ces quantités : *QuantitKind* et *Quantity*.

<b>QuantityKind</b> Volume <b>Type</b> : real ; <b>Min</b> : 0 ; <b>Max</b> : +maxreal ; <b>Dim</b> : L3 ; <b>End</b>	<b>Quantity</b> Volume <b>Kind</b> : Voltage ; <b>Min</b> : 0 ; <b>Max</b> : 1000 ; <b>Unit</b> : m3 ; <b>End</b>
--	--

Figure 4 - Exemple de *Quantity* et *QuantityKind*

Un *QuantityKind* porte un type de base (entier ou réel), une limite min, une limite max ainsi que la dimension au sens de l'analyse dimensionnelle de la quantité. Les valeurs infinies négatives et positives pour les bornes

du domaine sont notées -maxreal et +maxreal pour les réels et -maxint, +maxint pour les entiers. Une quantité est définie à partir d'un *QuantityKind*. La *QuantityKind* porte la dimension, la *Quantity* porte l'unité (cf Figure 4).

### 3.2. Représentation structurée via des modèles

De manière générale, un problème de conception est représenté par un ensemble de modèles DEPS, de sorte que la caractéristique fondamentale du langage DEPS est le "modèle" (*Model*). Tout modèle encapsule dans l'ordre : un ensemble d'arguments, un ensemble de constantes (*Constants*), un ensemble de variables (*Variables*), un ensemble d'éléments (*Elements*) et un ensemble de propriétés (*Properties*). Les arguments peuvent être des constantes ou des identifiants d'éléments. Les éléments sont des instances d'autres modèles.

DEPS offre des capacités de structuration des modèles et permet ainsi de capturer la structure sous-définie d'un problème et d'une classe de système. Il est possible d'exprimer des relations d'héritage, de composition et d'agrégation entre modèles et instances de modèles. Tout modèle possède une signature ce qui permet d'exprimer plusieurs modèles ayant le même nom avec des arguments et des contenus différents (cf Figure 5).

<b>Model</b> GasModel (MM) <b>Constants</b> MM : MolarMass ; <b>Variables</b> M : mass ; <b>Elements</b> <b>Properties</b> <b>End</b>	<b>Model</b> Tank(p, t, Gas) <b>Constants</b> R : Real = 8.314 ; p : Pressure ; t : Temperature ; <b>Variables</b> V : Volume ; <b>Elements</b> Gas : GasModel[MolarMass] ; <b>Properties</b> p*V= (Gas.M/Gas.MM)*R*t; <b>End</b>
--	--

Figure 5 - Exemple de modèle de Gaz et de réservoir en DEPS

### 3.3. Encapsulation des propriétés

Plusieurs types de propriétés peuvent être encapsulées dans un modèle DEPS :

- des équations ou inéquations algébriques linéaires ou non linéaires
- des propriétés en extension, par morceaux
- des méta propriétés : contraintes conditionnelles.

<b>Problem</b> Problem() <b>Constants</b> <b>Variables</b> <b>Elements</b> O2:GasModel(0.032); H2:GasModel(0.002); T1:Tank(2.56e+7,300,O2); T2:Tank(7.00e+7,300,H2); <b>Properties</b> O2.Mass = 10; T2.V = 500; <b>End</b>
--

Figure 6 - Exemple de problème en DEPS

Finalement, les instances de modèles doivent satisfaire les propriétés exprimées dans le modèle ou héritées. Il est également possible de définir un critère à optimiser. Une fois les modèles créés, il est nécessaire d'exprimer le problème (*Problem*) particulier à résoudre (cf Figure 6).

## 4. L'ENVIRONNEMENT DE MODELISATION ET DE RESOLUTION DEPS STUDIO

L'environnement intégré de modélisation et de résolution DEPS Studio [5-7] associé au langage DEPS comprend un éditeur de modèle, un gestionnaire de projet, un compilateur et un solveur. L'expérience montre que la spécification d'un problème de conception de système n'est jamais correcte du premier coup et que de nombreuses erreurs de modélisation ne sont détectables que par le calcul. Nous avons donc décidé de développer et d'intégrer notre propre solveur dans l'environnement de développement afin que la recherche de solutions contribue efficacement au processus de modélisation du problème. Il s'agit d'une approche de développement rapide de modèles (analogue à une approche RAD) qui, contrairement à une approche de transformation de modèles, réduit le temps d'exécution de la boucle de développement de modèles. Elle permet également de remonter les erreurs jusqu'au bon niveau d'abstraction.

La résolution d'un problème de conception nécessite la capacité de prendre en compte :

- les problèmes sous contraintes
- les équations et inégalités algébriques non linéaires sur des domaines mixtes
- d'autres types de relations telles que les tables de valeurs.

Pour ce faire, nous avons développé un solveur mixte, à base de contraintes, dédié au calcul sur des modèles DEPS structurés.

Les méthodes de calcul que nous utilisons sont issues des techniques de programmation par contraintes. La structure des modèles DEPS est préservée tout au long de la chaîne de compilation jusqu'aux modèles de calcul.

Le solveur implémente une méthode de propagation HC4 révisée sur les équations et les inégalités. Initialement prévue pour les domaines continus, nous avons étendu la méthode aux quatre types de domaines : les intervalles réels ouverts, les intervalles entiers, les ensembles énumérés de valeurs flottantes et les ensembles énumérés de valeurs entières signées. Il traite naturellement les boucles algébriques.

Dans le cas d'un problème sur-contraint, un échec peut survenir lors de la première propagation ou après avoir exploré les parties restantes de l'arbre de recherche. L'échec est interprété comme la preuve qu'il n'existe pas de solution au problème et non comme un échec de l'algorithme de résolution. A contrario, l'algorithme de résolution garantit la correction des solutions générées.

## 5. CAS D'ETUDE ACADEMIQUES ET INDUSTRIELS

Notre approche a été validées sur les cas d'étude académiques et industriels suivants :

a) dimensionnement de robot sous exigences fonctionnelles [3]

b) dimensionnement de système de transmission par adhérence sous exigences fonctionnelles et environnementales [8]

c) configuration et positionnement de caméra embarquée sous exigence de coût et de fiabilité [2]

d) synthèse d'architecture avionique modulaire embarquée sous exigences de sûreté de fonctionnement, sécurité et capacité [9-10]

e) synthèse d'architecture de commande de système de gestion et distribution électrique embarquée avion sous exigences de sûreté de fonctionnement [11]

f) génération d'architecture de système de stockage d'énergie embarqué sous exigences fonctionnelles [12-15].

Le tableau 1 synthétise pour chaque cas d'étude :

- le type de problème adressé : dimensionnement (d), configuration (c), allocation/déploiement (a), génération d'architecture (ga)

- le type d'inconnue : Discret, continu, Mixte

- le type de système : mécanique (m), génie électrique (ge), système embarqué (se), cyber-physique (cps)

- le type d'exigence : fonctionnelle (f), sûreté de fonctionnement (sur), sécurité(sec), environnemental (env), coût (co), fiabilité (fia).

Tableau 1 - Caractéristiques des cas d'étude

Cas d'étude	Type de problème	Calcul	Système	Exigence
a	d	continu	m	f
b	d	mixte	m	f, env,co
c	d,c	mixte	cps	f, co, fia
d	d, a, ga	discret	se	f, sec, sur
e	d, a, ga	discret	cps	f, sur
f	d, ga	mixte	ge	f

## 6. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une première version de travaux visant à concevoir des systèmes techniques par le biais de la synthèse. La démarche que nous proposons est particulièrement indiquée en conception préliminaire et en intégration de systèmes. Elle est composée de trois volets : La méthode MBSS, manière de voir la synthèse de systèmes, le langage DEPS pour la représentation des problèmes de conception et l'environnement intégrer de modélisation et de résolution DEPS Studio. La démarche a été validée sur plusieurs cas d'étude académiques et industriels.

Dans sa version actuelle, DEPS permet d'exprimer naturellement des problèmes de dimensionnement. Il dispose également de fonctionnalités permettant la représentation de certains problèmes de configuration, d'allocation et d'architecture. Nous travaillons au sein de l'association DEPS Link [16] à enrichir le langage DEPS afin qu'il puisse exprimer d'autres types de problèmes de conception. Nous nous concentrons sur la construction de collections d'éléments et l'expression de propriétés sur

celles-ci. Nous travaillons également sur l'implémentation de contraintes spécialisées. L'objectif à long terme est d'adresser des problèmes complexes de synthèse d'architecture combinant de nombreuses exigences fonctionnelles (performance...) et non fonctionnelles (sûreté, sécurité...). Les résultats seront intégrés dans la prochaine version de DEPS Studio.

## RÉFÉRENCES

- [1] Yvars P.A., Zimmer L.. System Sizing with a Model-Based Approach: Application to the Optimization of a Power Transmission System, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol 18, July 2018.
- [2] Yvars P.A., Zimmer L.. Toward a correct by construction design of complex systems : The MBSS approach, *Procedia CIRP*, Vol 109, Elsevier, 2022.
- [3] Yvars P.A., Zimmer L.. DEPS Un langage pour la spécification de problèmes de conception de Systèmes, proc of the 10th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation (MOSIM 2014), France.
- [4] Yvars P.A., Zimmer L.. Integration of Constraint Programming and Model-Based Approach for System Synthesis, proc of the IEEE International Systems Conference, SYSCON 2021, Vancouver, Canada.
- [5] Yvars P.A., Zimmer L.. Contraintes, objets et ontologies pour la conception de systèmes complexes, Conférence Nationale sur les Applications pratiques de l'Intelligence Artificielle, dans le cadre de la plateforme IA, PFIA, Bordeaux, 2021.
- [6] Yvars P.A., Zimmer L.. DEPS Studio : Un environnement intégré de modélisation et de résolution de problèmes de conception de systèmes, 8<sup>ème</sup> Conférence en ingénierie du logiciel (CIEL 2019), Toulouse, 2019.
- [7] Yvars P.A., Zimmer L.. DEPS Studio : Un environnement intégré de modélisation et de résolution pour la synthèse de système, 20<sup>ème</sup> journées AFADL, Approche Formelle dans l'Assistance au Développement de Logiciel, Montpellier, 2021.
- [8] Yvars P.A., Zimmer L.. A Model-based Synthesis approach to system design correct by construction under environmental impact requirements, *Procedia CIRP*, Vol 103, Elsevier, 2021.
- [9] Zimmer L., Lafaye M., Yvars P.A.. Modélisation d'exigences pour la synthèse d'architecture avionique : Application à la sûreté de fonctionnement, 16<sup>ème</sup> journées AFADL, Approche Formelle dans l'Assistance au Développement de Logiciel, Montpellier, 2017.
- [10] Zimmer L., Yvars P.A., Lafaye M.. Models of requirements for avionics architecture synthesis: safety, capacity and security, proc of the Complex System Design and Management conference - CSD&M 2020, December 2020, Paris, France.
- [11] Zimmer L., Yvars P.A.. Synthesis of software architecture for the control of embedded electrical generation and distribution system for aircraft under safety constraints: The case of simple failures, proc of the 14<sup>th</sup> International Conference of Industrial Engineering, CIGI-QUALITA 2021, Grenoble, France.
- [12] Diampovesa S., Hubert A., and Yvars P.A., "Modélisation d'un problème de conception en vue de réutilisabilité. Exemple d'une batterie Li-ion", *Symposium de Génie Electrique (SGE 2020)*, 2020.
- [13] Diampovesa S., Hubert A., Yvars P.A.. Designing Physical Systems through a Model-Based Synthesis Approach. Example of a Li-ion Battery for Electrical Vehicles, *Computers In Industry*, Vol 129, 2021.
- [14] Diampovesa S, Yvars P.A., Hubert A.. Using Synthesis and Analysis for Design in Systems Engineering: an Integrated Approach, *INSIGHT*, Vol 24, Issue 4, Wiley, 2021.
- [15] A. Hubert A., Forgez C., Yvars P.A.. Designing the architecture of electrochemical energy storage systems. A model-based system synthesis approach, *Journal of Energy Storage*, Vol 54, 2022
- [16] site de l'association depsslink. <https://www.depsslink.com>

# Industrie du Futur et santé-sécurité : l'Ingénierie Système apporte-elle une réponse ?

B. Daille-Lefèvre <sup>a,\*</sup>, N. Guerroum <sup>a,b</sup>, X. Godot <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institut National de Recherche et de Sécurité,  
1, rue du Morvan  
54519 Vandoeuvre lès Nancy – France

<sup>b</sup> Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers,  
4, rue Augustin FRESNEL  
57078 Metz Cedex 03 – France, adresse

\* e-mail : bruno.daille-lefevre@inrs.fr

## 1. INTRODUCTION

Quel que soit le contexte industriel ou les progrès, la sécurité des machines reste une obligation. La directive européenne dite « machines » [1] précise que cette obligation doit être prise en compte dès la conception, via une démarche itérative qu'elle détaille. De précédents travaux de recherche [2] rappellent que ce processus repose sur l'identification de tous les usages de la future machine. Cette étape préalable est questionnée par le nouveau paradigme de l'Industrie du Futur [3-6]. L'une des visées de celle-ci est, en effet, la création de moyens de productions flexibles, s'adaptant aussi bien aux variations du produit que des ressources [7-11]. Les concepteurs peuvent-ils trouver avec l'ingénierie système les ressources pour répondre à la contradiction suivante : créer une machine conforme alors que son usage n'est pas complètement connu et figé ? Cet article présente une proposition de démarche de conception qui intègre la flexibilité en se basant sur des éléments issus de la modélisation système pour faciliter l'analyse des risques. Cette démarche est ensuite illustrée par un exemple.

## 2. LA CONFORMITE D'UNE MACHINE REPOSE SUR L'IDENTIFICATION DES USAGES

L'union européenne s'est dotée de directives communautaires pour permettre la libre circulation des biens au sein de ses frontières et protéger ses citoyens. Pour préserver la santé des travailleurs, les machines doivent ainsi répondre à différents critères. La directive « machine » [1] établit notamment une démarche itérative d'analyse puis de réduction des risques. Cette

démarche (Figure 1) est à suivre dès les premières étapes de la conception d'une machine.

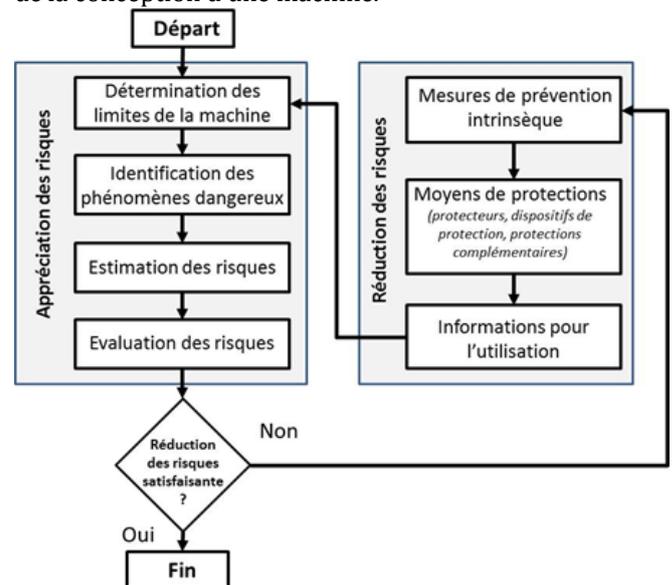


Figure 1 - Démarche santé-sécurité lors de la conception d'un équipement de travail

Comme le rappelle Demarziani [2], la première étape vise à définir « tous les usages... » de la future machine. Cette étape est déjà un défi pour une machine industrielle classique. Des travaux antérieurs proposent un modèle pour aider le concepteur à établir ces usages ou « tâches de travail » [12]. Via un jeu de questions, le concepteur et son client sont amenés à décrire un contexte d'utilisation de la machine, plus large et complexe que ce que laisse généralement supposer les cahiers des charges rédigés lors de la commande initiale.

### 3. UN NOUVEAU CONTEXTE : L'INDUSTRIE DU FUTUR

L'Industrie du Futur [7-11], qualifiée de quatrième révolution industrielle, est la réponse industrielle aux nouvelles attentes des consommateurs, comme des produits personnalisés. La réponse à ces attentes pourrait passer par une réorganisation profonde de l'entreprise et notamment l'intégration de nouveaux moyens de production flexibles et connectés, comme les robots collaboratifs, et des équipements de travail reconfigurables. Ces derniers doivent en effet s'adapter à la variabilité du produit à réaliser, aux quantités à produire, à la cadence et aux ressources pour les conduire : des opérateurs ou des robots collaboratifs.

Prévoir alors l'ensemble des usages de ces machines dès leur conception, comme le réclame la directive européenne dite « machines » [1], devient difficile. Le concepteur doit pourtant concevoir et fournir une machine conforme, répondant aux attentes de protection des opérateurs.

### 4. L'INGENIERIE SYSTEME DETIENT-ELLE L'OUTIL ADAPTE ?

L'Ingénierie système (IS) permet de formaliser et de modéliser des systèmes complexes via un langage partagé par les membres du projet, depuis l'expression du besoin jusqu'à l'architecture de ce système. Elle permet d'aborder la complexité sans entrer dans les particularités techniques de chaque métier [13]. Pour ce faire, une panoplie d'outils est à disposition pour identifier la mission que devra remplir le système, le contexte, les parties prenantes, internes et externes au système, leurs besoins spécifiques selon les phases de vie et leurs scénarios d'utilisations. Sur cette base, il est alors possible de modéliser l'architecture du système et de ses sous-systèmes, jusqu'aux caractéristiques du composant à acheter ou à concevoir, tout en vérifiant l'adéquation des caractéristiques aux exigences exprimées. L'articulation de ces outils est à la main du concepteur et s'inscrit dans un processus itératif.

L'Ingénierie Système présente-elle un intérêt pour la prévention des risques lors de la conception d'équipements de travail, notamment dans un contexte d'Industrie du Futur ? Certains outils ou notions, comme les parties prenantes, ou les scénarios multiples d'utilisation semblent être des pistes à explorer [14]. Ainsi, par exemple, le recensement de l'ensemble des personnes et des éléments présents dans l'environnement et dans toutes les phases de vie du système à concevoir permet d'inclure l'homme dans le système ou dans l'environnement du système. Cela donne l'opportunité de considérer, dès l'expression du besoin, les opérateurs, les techniciens de maintenance, et également les tierces personnes à prendre en compte pour l'analyse des risques. Du point de vue de l'Industrie du Futur, les besoins de flexibilité ou de reconfiguration peuvent être intégrés via les scénarios d'utilisation de l'équipement. Mais une fois que la machine est conçue comment reprendre la conception ? Une autre piste est la

traduction de cette exigence de flexibilité au niveau de l'architecture de la machine. Les concepteurs peuvent bâtir, avec les outils de représentation de l'IS, des architectures de systèmes complexes, selon différentes granulométries. Cette piste a été suivie par Abid lors de ces travaux de thèse [15]. En effet, il utilise les outils de l'ingénierie système pour modéliser les systèmes manufacturiers reconfigurables, ce qui est similaire au paradigme d'Industrie du Futur, et y ajoute des modèles d'architectures holoniques pour passer du stade conceptuel à la simulation. Cette réduction de la problématique de flexibilité à un ensemble architectural d'éléments fonctionnels sûrs reconfigurables peut potentiellement permettre d'envisager la complexité des situations de travail autour d'un équipement de travail dans un contexte d'Industrie du Futur. Cette idée permettrait de construire une machine ou des éléments de machine sûrs sans connaître ses usages de manière exhaustive. Mais assurer qu'une fonction élémentaire soit sûre quelle que soit sa configuration dans la future machine amène deux conséquences opposées :

- Soit cette promesse de sécurité est assurée en ne laissant aucun accès au phénomène dangereux, ce qui peut entraver l'usage prévu. La figure 2 illustre une machine rendue conforme en plaçant tout autour un carter empêchant l'opérateur de se blesser... et de travailler (Figure 2).

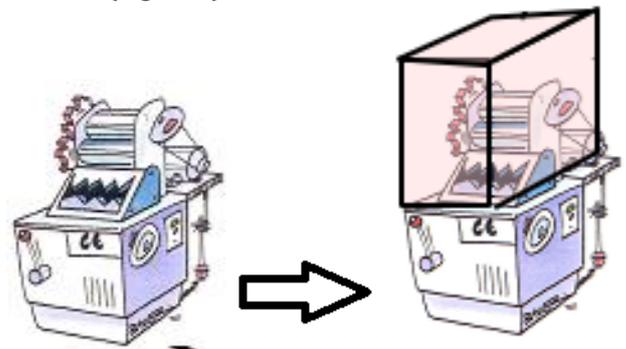


Figure 2 - Illustration d'une machine sécurisée par ajout d'un protecteur périphérique empêchant l'accès aux zones dangereuses, sans penser à l'usage.

- Soit nous nous retrouvons dans le cas des quasi-machines (comme un robot industriel, livré nu, sans outil ou pince au bout du bras) où une analyse des risques est nécessaire pour chaque mise en œuvre nouvelle. De plus, rien ne garantit a priori que la somme de deux fonctions sûres aboutisse à un ensemble sûr.

En conséquence, l'ingénierie système, en l'état, n'apporte pas de réponse satisfaisante ou complète au problème soulevé.

### 5. PROPOSITION D'UNE DEMARCHE POUR AIDER LE CONCEPTEUR DE MACHINE DANS LE CADRE DE L'INDUSTRIE DU FUTUR

De précédents articles [16-19] présentent les étapes qui ont contribué à élaborer la proposition présentée ici. Face à notre difficulté à élaborer une démarche répondant à la foi aux exigences de la directive

européenne dite « machines » [1] et aux attentes de l'Industrie du Futur, nous avons choisi, dans un premier temps, de différer la prise en compte de certaines contraintes liées à l'Industrie du Futur. Ainsi, une démarche a été élaborée sur la base d'un ou des usages figés lors de l'écriture du cahier des charges de l'équipement de travail, et d'un report, à une autre étape de conception, de la flexibilité attendue par l'Industrie du Futur.

Cette démarche s'appuie sur un processus de conception générique, généralement admis [20]. Pour étayer cette démarche, nous avons choisi et ordonné certains outils de l'ingénierie système (Figure 3), selon leur intérêt perçu au paragraphe précédent.

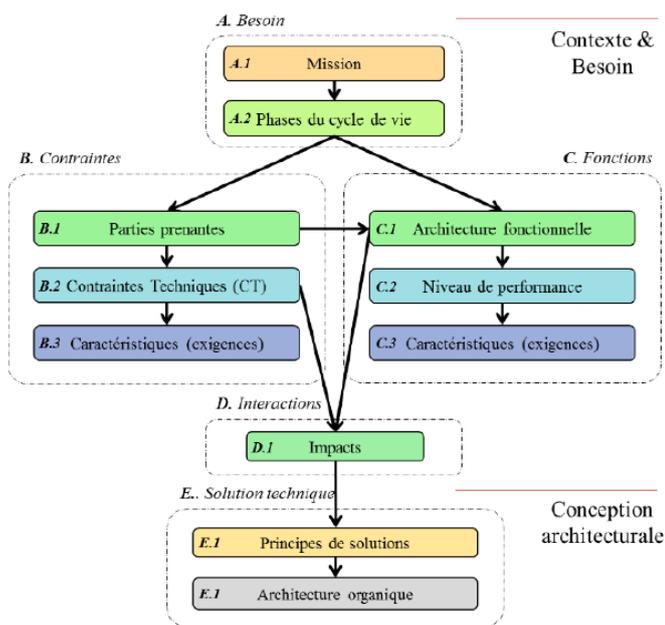


Figure 3 - Enchaînement des outils de l'ingénierie système dans la démarche de conception retenue [21].

Via cette démarche, les données de conception sont identifiées, listées puis remaniées pour aider le concepteur à mettre en évidence les différents usages de la future machine [21]. Pour ce faire, la méthode proposée se base sur l'étude des interactions entre les différentes parties prenantes, comme sur le schéma de principe suivant (Figure 4). Ces interactions sont révélatrices des usages liés à cet équipement de travail, aux ressources

disponibles pour accomplir le travail (ou la mission attendue du système complet) et aux éléments extérieurs (atelier, personnel...) présents dans l'environnement de cet équipement.

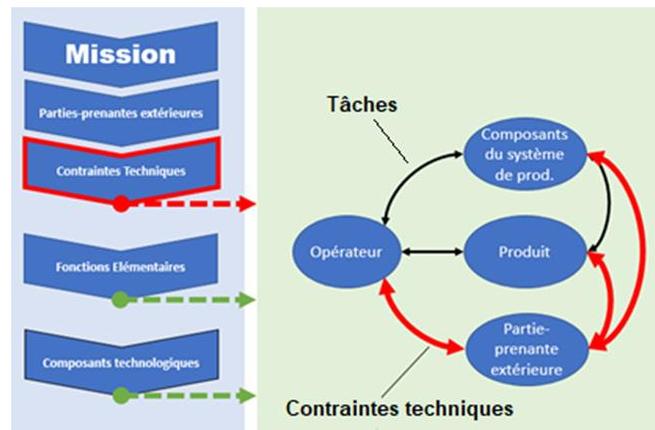


Figure 4 - Représentation des interactions entre les parties prenantes internes et externes du système, révélatrices d'usages.

Pour identifier plus aisément ces interactions à partir de toutes les données exprimées précédemment, nous proposons de détailler les fonctions élémentaires en trois sous-fonctions, détaillant les parties commande, action et contrôle de cette fonction :

- Commande : Analyse et ordre de réalisation de l'action,
- Action : Réalisation concrète de la fonction élémentaire,
- Contrôle : mesure et traitement en vue d'informer la commande.

Puis, le concepteur est invité à spécifier les éléments, issus des parties prenantes internes et externes, qui participent aux parties commande, action et contrôle de cette fonction. Ensuite, le concepteur devra établir les liens, ou interactions, entre ces éléments, en décrivant s'il s'agit de tâches prescrites, d'échange de données ou d'interactions possibles avec un élément de l'environnement du poste de travail.

La figure 5 illustre ceci par l'exemple d'une fonction appelée « positionner le cube » au cours de laquelle l'opérateur doit prendre en main un cube et l'emmener à une position prédéterminée sur la table et vérifier visuellement s'il est bien mis en place, sinon il doit reprendre le cube et le repositionner.

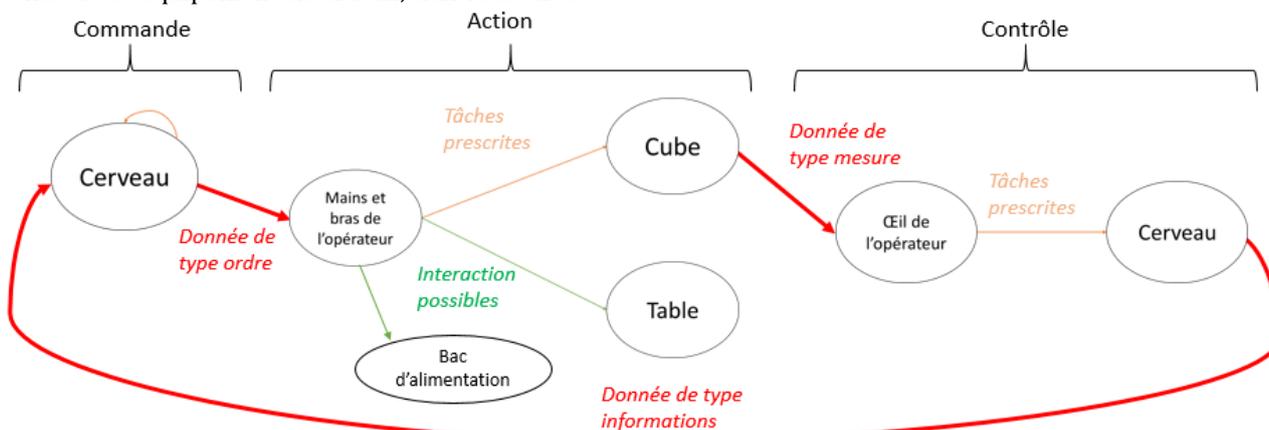


Figure 5 - Exemple de graphe des interactions, établi dans le cas de la conception du poste de test de cubes, pour le groupe fonctionnel « positionner le cube » en mode manuel.

Chaque lien est une interaction, révélatrice d'un usage possible (déplacement d'une pièce, réflexion pour prendre une décision, visualisation pour contrôler ou anticiper...). Pour affiner ceci, chaque interaction est elle-même détaillée selon trois critères : l'énergie qu'elle nécessite ou génère ; sa structure ou géométrie ; et l'objectif ou le but de cette interaction (Figure 6).



Figure 6 - Niveau de détails demandé pour décrire chaque interaction (lien), identifié précédemment (Figure 5), pour faciliter l'analyse santé-sécurité.

Ces informations faciliteront par la suite l'analyse santé-sécurité et les prises de décisions du concepteur pour éliminer ou réduire les risques que peut engendrer la machine pour l'opérateur, et ainsi respecter la loi [1].

Une fois que l'équipement de travail est conçu, fabriqué et livré dans l'atelier de production, si un élément (partie prenante interne ou externe) est modifié, ajouté ou retiré, les documents établis par le concepteur, et notamment le graphe des interactions (Figure 5), permettront d'en identifier les effets partout où cet élément est utilisé. Ces graphes guideront l'utilisateur pour prendre les décisions nécessaires pour maintenir l'équipement en état de conformité, sans avoir à reprendre une analyse santé-sécurité complète de la machine. Cet ajout méthodologique en conception et documentaire (dossier technique remis avec l'équipement) permettent de mener conjointement le respect de la réglementation et les attentes de flexibilité de l'Industrie du Futur. Ainsi, la conception ne s'arrête pas au bureau d'étude, à la conception de la machine proprement dite, mais continue sur le lieu de son utilisation en prenant en compte les éléments de contexte évolutif.

## 6. EXEMPLE D'APPLICATION DE LA DEMARCHE PROPOSEE

Pour tester la méthode proposée, un poste de test électrique de produits, a été conçu, depuis l'expression du besoin jusqu'à la conception architecturale et détaillée (Figure 7).

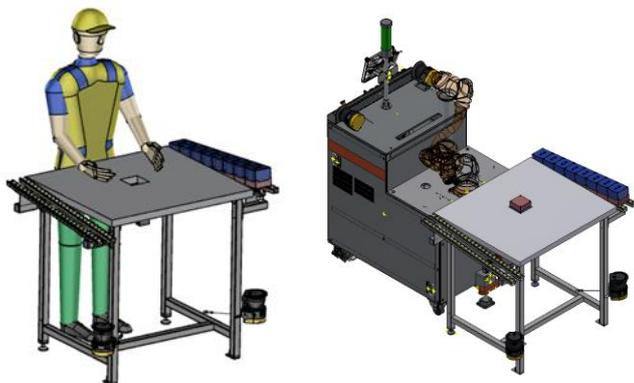


Figure 7 - Poste de travail comportant une machine de test électrique des produits, manipulés par un opérateur ou un robot collaboratif.

Il s'agit d'un poste de travail en position debout, tenu soit par un opérateur soit par un robot collaboratif, comportant : une zone d'amenée des produits à tester, une zone d'évacuation des produits et une machine effectuant un test de continuité électrique puis d'épreuve électrique des produits.

La méthodologie proposée dans cette étude a été appliquée, étape par étape, pour déterminer la mission du système, les parties prenantes, les fonctions élémentaires et choisir deux scénarios de fonctionnement.

Puis le concepteur a proposé et évalué des solutions techniques. Il a fallu ensuite établir les graphiques d'interactions pour chaque fonction avec ses propositions techniques associées. Les figures 5 et 8 montrent les graphes d'interactions pour la fonction « Positionner un cube », en modes manuel et robotisé, détaillés en énergie, géométrie et objectifs.

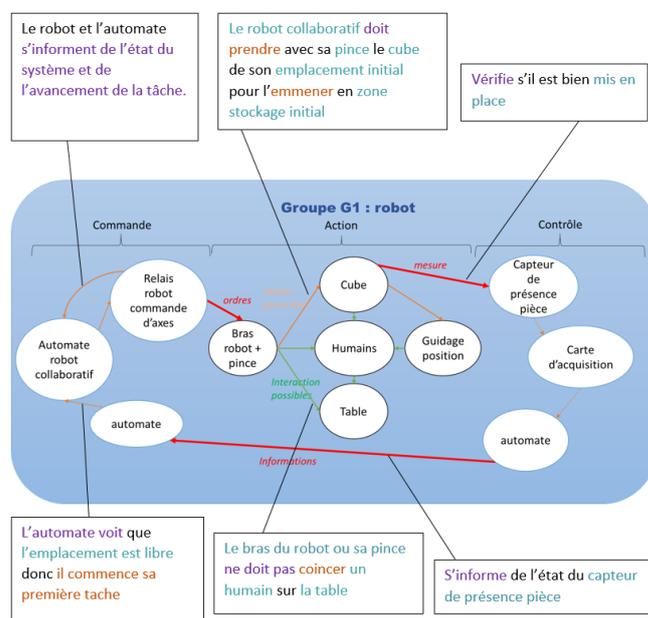
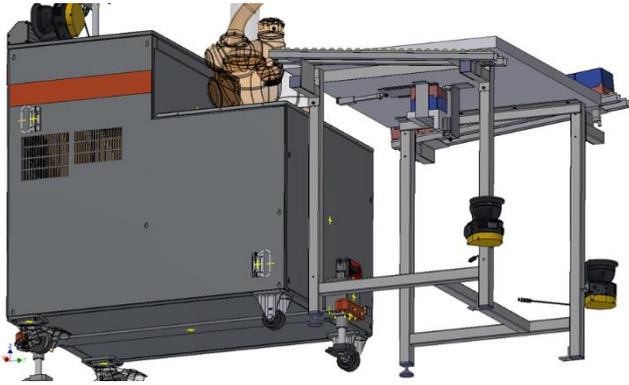


Figure 8 - Graphe des interactions pour la fonction « positionner le cube » en mode robot. Légende des textes encadrés : Ce qui est en mauve est l'objectif, en rouge l'énergie et en bleu la géométrie.

Par ce type de représentations, faite à chaque itération de conception (proposition de solutions, analyse, retour à l'étape de propositions techniques ou d'architecture fonctionnelle), des risques ou des impératifs liés à l'usage sont repérés et revus par le concepteur. Ainsi, dans l'exemple ci-dessus, la lecture des graphes d'interaction montre que l'opérateur et l'automate doivent identifier l'endroit où positionner le cube pour savoir si l'emplacement est libre. Par conséquent, le concepteur doit positionner des capteurs de position pour l'automate et choisir une géométrie des différents composants de manière à ce qu'ils ne gênent pas la vision de l'opérateur sur son activité.

De même, l'étude de l'interaction entre le bras du robot et la table (poste de travail) montre que le robot ne doit pas pouvoir coincer un humain (sa main, son bras) contre la table. Cette exigence de sécurité entraîne des conséquences pour le concepteur (disposition des éléments à fleur du plan de travail pour faciliter les

déplacements du robot sans risque de coincement contre un élément, position de la machine de test sous le plan de travail (Figure 9)) et pour l'automaticien (programmation d'un plan de sécurité pour que le robot reste à une certaine distance au-dessus du plan de travail).



**Figure 9 - Conception détaillée du poste de travail et de sa machine de test électrique, placée sous le plan de travail, vue sans son carter de protection.**

## 7. DISCUSSION

Pour répondre à la fois aux exigences de la loi en terme de sécurité des machines [1], dans tous leurs usages prévisibles, et au paradigme de l'Industrie du Futur [7-11], impliquant des machines flexibles, les concepteurs ont besoin d'outils ou de méthodes les aidant dans leur tâche de conception.

La démarche proposée dans cet article repose principalement sur l'identification des parties prenantes, de leurs contraintes et sur l'architecture fonctionnelle puis organique de la future machine. Sur cette base, un graphe identifiant les interactions souhaitées et possibles entre les parties prenantes au sein de chaque fonction technique permet de caractériser les usages (tâches prescrites) et de compléter la liste des risques potentiels (interactions possibles). La description littérale de chaque interaction, en détaillant ses objectifs, les géométries impliquées et les énergies mises en œuvre, facilite l'analyse de risques, précédant une démarche de réduction des risques engendrés par la future machine sur la santé et la sécurité de l'opérateur.

L'exemple académique présenté ici illustre cette démarche et confirme son intérêt. Cependant, sous sa forme actuelle, cette proposition peut être questionnée quant à sa mise en œuvre aisément par les concepteurs. Elle leur demande un surcroît de travail et un effort d'abstraction pour en maîtriser le processus, les outils, la représentation et les attendus. Une piste serait de simplifier cette démarche et de la transmettre aux préventeurs afin d'illustrer et d'animer des réunions pluridisciplinaires lors du suivi de projet de conception d'une machine industrielle.

Un autre point mérite notre attention : pour répondre au problème initial soulevé dans cet article et proposer une démarche aidant les concepteurs dans leur tâche, la démarche proposée a pris le parti de différer la prise en compte de l'exigence de flexibilité, mise en avant par l'Industrie du Futur. Ce choix a été dicté par l'impossibilité

pour notre équipe de trouver un outil, une méthode ou une démarche aidant le concepteur à répondre à la fois à la loi (prévoir tous les usages de la future machine [1]) et au souhait de l'Industrie du Futur de disposer de machines flexibles s'adaptant aux variations de produit et de ressources [7-11]. In fine, comme expliqué dans le corps de cet article, l'application de la démarche proposée ici n'aboutit pas la conception d'une machine à la fois flexible et conforme à la loi. Au sortir du bureau d'étude, le concepteur proposerait alors une machine conforme à la loi, c'est-à-dire dont l'usage est sûr, pour seulement un certain type d'utilisations définies clairement dans le cahier des charges initial (en faisant un parallèle avec l'aéronautique, nous pourrions dire « dans un certain domaine de vol »). Le concepteur joindrait également à la machine un ensemble documentaire, dont les graphes d'interactions. Ces documents permettraient à l'industriel utilisateur de la machine, via son propre service méthodes et industrialisation, de reprendre la conception et de modifier la machine si une partie prenante du système évoluait, apparaissait ou disparaissait. En s'appuyant notamment sur les graphiques illustrant les interactions entre les parties prenantes au sein de chaque fonction, il pourrait anticiper les conséquences de ce changement en terme de sécurité et en évaluer l'effet sur les choix de conception initiaux de la machine ou les besoins de modifications éventuelles.

Du point de vue de la loi [1], il s'agit alors d'une modification de machine, ce qui implique une analyse des risques, facilitée par le corpus documentaire accompagnant la machine, établi et étayé ici en appliquant la démarche proposée.

Du point de vue de l'Industrie du Futur et de son paradigme, la question de la flexibilité demeure problématique car elle met à mal le souhait de disposer de machines flexibles, reconfigurables « à la volée » dans l'atelier. Ce constat est d'ailleurs confirmé en parallèle par une autre étude portant sur l'utilisation et la sécurisation de postes de travail mettant en œuvre des robots dit « collaboratifs » [22], [23].

Il ne s'agit pourtant pas d'un échec mais d'une ouverture, d'une passerelle entre deux mondes : le bureau d'étude et l'atelier, via la notion de conception partagée. La démarche proposée fait le lien documentaire et méthodologique entre la conception et les nécessaires modifications de la machine pour en assurer la flexibilité, l'adaptation aux tâches qui lui seront dédiées lors de la partie productive de son cycle de vie.

## 8. CONCLUSION

Cet article part du constat d'une injonction contradictoire faite aux concepteurs de machines : appliquer la loi [1], en prenant en compte tous les usages de la future machine pour assurer, dès la conception, la sécurité de l'opérateur, et prendre en compte le paradigme de l'Industrie du Futur, impliquant des machines flexibles dont l'utilisation s'adaptera aux variations du produit et des ressources. Ce constat entraîne un besoin d'outils ou de démarches pour aider

les concepteurs à effectuer leur travail dans ce nouveau contexte industriel.

Cet article propose et illustre une démarche dont le livrable, principalement documentaire, permet de répondre, en partie, à cette problématique. Cette démarche s'inscrit dans la notion de « conception partagée », initié par le bureau d'étude autour d'un périmètre restreint et sécurisé d'usages de la machine, puis complété, modifié, dans l'atelier, pour s'adapter aux contraintes de production rencontrées, le tout dans le respect de la loi vis-à-vis de la sécurité et la santé des opérateurs.

Cette proposition nécessite cependant d'être testée par des professionnels de la conception et de la prévention pour être validée selon différents critères (niveau de complexité ressenti, degré d'appropriation potentielle, intérêt pratique en conception et en réduction des risques...).

## REFERENCES

- [1] Directive 2006/42/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux machines du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE. Journal officiel 09/06/2006, L 157/64-L157/86
- [2] Demarziani A., Etienne A., Daille-Lefèvre B. Towards a data model to describe future usages of industrial systems to integrate Health and Safety in early design phase. 16e Colloque National S-mart, Les Karellis (France) – 3 au 5 avril 2019
- [3] Zorzenon R., Lizarelli F. L., Moura D. B.A. DE A. What is the potential impact of industry 4.0 on health and safety at work? Safety Science 153, 18 p., 2022
- [4] Badri A., Boudreau-Trudel B., Saadeddine Souissi A. Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? Safety Science 109 pp. 403-411, 2018
- [5] Blankemeyer S., Recker T., Stuke T., Brokmann J., Geese M., Reiniger M., Pischke D., Oubari A., Raatz A. A Method to Distinguish Potential Workplaces for Human-Robot Collaboration. 7th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, Procedia CIRP 76, pp. 171-176, 2018
- [6] Michalos G., Makris S., Tsarouchi P., Guasch T., Kontovrakis D., Chryssolouris G. Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces. CIRPe 2015 - Understanding the life cycle implications of manufacturing, Procedia CIRP 37, pp. 248 - 253, 2015
- [7] Veltz P. et Weil T. L'industrie, notre avenir. La Fabrique de l'Industrie, Eyrolles 2015, ISBN : 978-2-212-56115-9
- [8] Technologies prioritaires 2020 en mécanique, CETIM 6B13, octobre 2015, ISBN 978-2-36894-079-2
- [9] Guide pratique de l'usine du futur, enjeux et panorama de solutions, Fédération des Industries Mécaniques, octobre 2015, [www.industriedufutur.fim.net](http://www.industriedufutur.fim.net)
- [10] FOF, (2013) Factories of the future. Strategic Multi-annual roadmap for the contractual PPP under horizon 2020, European commission, Directorate-General for Research and Innovation, Directorate G - Industrial Technologies, Unit G.2 - 'New forms of production'.
- [11] INRS - Modes et méthodes de production en France en 2040 : quelles conséquences pour la santé et la sécurité au travail ? <http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/prospective-2016/synthese-sante-travail2040.pdf>, 72 p.
- [12] Daille-Lefèvre B., Marsot J., Etienne A., Demarziani A. Le concept de tâches en conception sûre d'équipements de travail. MOSIM 2016, 22-24 août 2016, Montréal, Canada. 7 p.
- [13] AFIS (association française d'ingénierie système). Livre Blanc AFIS. Ingénierie Système : la vision AFIS pour les années 2020-2025. 111 p., 2011
- [14] Mauborgne P. Vers une ingénierie de systèmes sûrs de fonctionnement basée sur les modèles en conception innovante. Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine, École doctorale RP2E (Ressources, Procédés, Produit, Environnement), Génie des Systèmes Industriels, 199 p., 2016
- [15] Abid A. Approche basée sur l'Ingénierie Système pour la Conception Intégrée des Systèmes Manufacturiers Reconfigurables. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay et de l'Université de Sfax, préparée à Centrale Supélec, 137 p., 2019
- [16] Martin P., Marsot J., Daille-Lefèvre B., Godot X., Abba G. et al. New Issues for Workers Safety in the Factory of the Future. Advances on Mechanics. Design Engineering and Manufacturing II, Springer, pp.402-411, 2019, 9783030123451. hal-02310753
- [17] Martin P., Daille-Lefèvre B., Siadat A., Marsot J., Godot X., Savin J., El Idrissi El Bouzidi R., Gomez Echeverri J. C., Essid L. Résultats préliminaires sur les nouveaux challenges de santé-sécurité au sein de l'usine du futur. [https://www.researchgate.net/publication/341979612\\_CIGI\\_QUALITA\\_2019-N13-Challenges\\_sante\\_securite-PMartin-juin2019](https://www.researchgate.net/publication/341979612_CIGI_QUALITA_2019-N13-Challenges_sante_securite-PMartin-juin2019)
- [18] Arias Corzo S. O., Daille-Lefèvre B., Godot X., Martin P. Conception sûre des systèmes de production : intégration de la santé/sécurité des opérateurs à travers l'analyse des usages. Congrès CIGI-Qualita, Mai 2021, Grenoble, France. hal-03324112
- [19] Martin P., Daille-Lefèvre B., Godot X., Petronijevic J. Workstation design centered to workers 'safe use, Advances on Mechanics. Design Engineering and Manufacturing IV - Editors: Salvatore Gerbino et al., Springer Springer Nature Switzzeland September 2022, DOI: 10.1007/978-3-031-15928-2\_7
- [20] Godot X. Interactions Projet/Données lors de la conception de produits multi-technologiques en contexte collaborative. Thèse de doctorat, Paris, ENSAM, 2013
- [21] Martin P., Daille-Lefèvre B., Godot X., Marsot J. Usine du futur : conception des postes de travail et aspects santé-sécurité. Technique de l'ingénieur, SF150, 18p., Juillet 2022
- [22] Tihay D., Sghaier A. Retour d'expérience sur la mise en oeuvre d'une application de robotique collaborative. 10ème Conférence Internationale « Safety of Industrial Automated Systems » 6/7/2021, AICHI
- [23] INRS. 10 questions sur les robots collaboratifs. Edition INRS, ED 6386, 2020

# Réutilisation de modèles en ingénierie système et écoconception

R. Chenouard <sup>a,\*</sup>, D. Tamzalit <sup>a</sup>, A. Dieumegard <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes, France

<sup>b</sup> Obeo, 7 Boulevard Ampère - 44481 Carquefou, France

\* e-mail : raphael.chenouard@ec-nantes.fr

## 1. INTRODUCTION

En ingénierie système (IS), le processus de développement est souvent basé sur le cycle en V. En s'appuyant sur ce schéma, diverses méthodes de conception ont été définies tout en se basant sur des modèles informatiques. Les travaux dans le domaine de l'ingénierie des modèles ont également permis de développer des méthodes de conception intégrées, basées sur des modèles (MBSE : *Model-Based Systems Engineering*), comme par exemple la méthode ARCADIA et la plateforme Capella [1]. Les approches MBSE permettent de faciliter les transitions entre les différentes phases de développement tout en assurant une meilleure traçabilité des données.

Dans le domaine de l'écoconception, les données relatives aux impacts environnementaux sont souvent évaluées tardivement dans le processus de développement d'un système. En effet, le niveau de détail nécessaire est alors un frein à une évaluation précoce de ces impacts avec une démarche d'analyse de cycle de vie (ACV). Cependant, les choix de conception effectués au plus tôt sont souvent déterminants pour la suite du processus de développement. En effet, les choix de principes d'architecture ou de technologie sont souvent effectués très tôt, alors que les composants du système ne sont pas encore entièrement déterminés. Dans le cadre d'un système complexe, les nombreux éléments modélisés, ainsi que les nombreuses évolutions de la définition du système rendent d'autant plus difficile l'intégration et le maintien de la cohérence de l'évaluation environnementale dans le processus de conception.

Dans le cadre d'une évaluation au plus tôt des impacts environnementaux, il n'est pas possible de définir exhaustivement les éléments nécessaires à une évaluation environnementale complète, car un certain nombre de choix de conception n'ont pas encore été faits. Dans la plupart des cas, des systèmes similaires ont déjà été conçus et évalués. En s'appuyant sur ces éléments existants, il est alors possible de construire des modèles d'évaluation environnementale s'appuyant sur ces précédents modèles pour faire de premiers calculs qui pourront être raffinés au fur et à mesure de l'avancement de la définition du système.

L'essor de la prise en compte des critères environnementaux dans les phases amonts de la conception d'un produit a donné lieu à divers travaux sur de nouvelles méthodes et cadre d'écoconception [2,3,4,5]. Depuis la norme ISO 15288 [6], l'ingénierie système intègre la prise en compte du cycle de vie du système, ce qui permet d'intégrer les démarches d'écoconception au processus d'IS [7]. Cependant, les environnements et les logiciels existants restent toujours hétérogènes quand on considère les outils d'IS et d'ACV [4,5].

Dans ce travail, nous avons exploré les possibilités de réutilisation de modèles dans un cadre d'évaluations environnementales précoces en ingénierie système. L'approche MBSE complétée par l'outillage produit durant le projet EcoPlex<sup>1</sup> a permis d'établir un pont entre l'outil d'ACV OpenLCA [1] et la plateforme Capella [8].

La section suivante décrit les principaux mécanismes de réutilisation de modèles identifiés. La section 3 décrit certains de ces mécanismes mis en œuvre dans l'outil produit durant le projet EcoPlex proposant une extension

<sup>1</sup> <https://www.ecoplex.fr/>

de la méthode Arcadia et de la plateforme Capella. La section 4 illustre l'approche sur le cas d'une cafetière électrique et la section 5 fait le bilan du travail réalisé et des défis restants.

## 2. MECANISMES DE REUTILISATION DE MODELES

D'un point de vue générique, un modèle au sens de l'ingénierie des modèles, n'est qu'un graphe dont la structure et la sémantique sont définis par un métamodèle [9]. Réutiliser un modèle ou une partie de modèle dans un nouveau modèle est donc l'intégration d'un (sous-)graphe dans un autre. Cependant, le contexte de MBSE et l'écoconception apportent une sémantique plus riche qui permet de considérer des scénarios spécifiques de réutilisation. Nous en considérons principalement trois : la définition d'un nouveau système utilisant des éléments préexistants, l'évolution d'un système existant et la définition d'un système proche d'un système existant. En plus de gérer l'intégration des éléments d'un modèle, le principal enjeu est d'accorder les données environnementales avec ces scénarios de réutilisation de parties de modèles. Dans le cadre du développement d'un nouveau système, ces trois scénarios de réutilisation de modèles sont souvent appelés de manière croisée.

### 2.1. Réutilisation de composants existants

Une partie de l'activité de conception d'un système complexe revient à sélectionner des composants existants pour les intégrer dans une architecture globale, les autres composants étant dimensionnés spécifiquement. Dans une démarche ACV, les données environnementales sont définies en lien avec une unité fonctionnelle donnant le périmètre du cycle de vie considéré. Les principales caractéristiques de ces données ACV sont la durée de vie prévue du système, les modalités d'extraction et de fabrication, les modalités d'usage et celles de fin de vie pour toutes les ressources mobilisées ou tous les flux entrants ou sortants.

Dans une approche systémique, chaque composant est aussi considéré comme un système avec la même modélisation possible que pour le système de plus haut niveau. Ainsi, nous faisons l'hypothèse, pour les composants existants, d'avoir une définition sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Dans le cadre de l'intégration d'un composant dans une architecture système, les modalités d'usage doivent être contextualisées avec celles du système. La durée de vie du composant peut être impactée et peut nécessiter des étapes de maintenance ou un remplacement. Cela offre également des pistes de réflexion quant au réemploi ou au reconditionnement de certains composants dont la durée de vie prévue est supérieure au système. Le scénario de fin de vie se retrouve également impacté et nécessite la définition de ce processus additionnel du point de vue ACV comme du point de vue modélisation système. La prise en compte de ces adaptations pour le modèle ACV et les données environnementales résultantes n'est possible

que si une certaine traçabilité est maintenue et que leur définition est la plus générique possible.

### 2.2. Évolution d'un système

L'évolution d'un système existant revient à reconsidérer une partie de ces éléments pour s'adapter à un besoin ou un contexte qui a changé. L'impact sur le modèle du système et l'ACV peuvent nécessiter les adaptations suivantes selon le type de changement :

- Évolution des fonctions du système : ajout ou modification d'un ou plusieurs composants. La démarche est alors la même que dans la sous-section 2.1. Ce type d'évolution est fréquent lors d'une mise à jour de fonctionnalité (ex : mise en conformité avec une nouvelle réglementation).
- Modification de la durée ou de la fréquence d'usage : l'ensemble des éléments doivent être mis en cohérence avec cette nouvelle temporalité. Comme dans la sous-section 2.1 les étapes de maintenances et de fin de vie peuvent être impactées.
- Modifications locales à une étape du cycle de vie (fabrication ou fin de vie). Dans ce cas, la traçabilité sur les données environnementales des composants impliqués permet de délimiter les répercussions à opérer sur cette même étape. Par exemple, si un système préalablement mis en déchetterie suit maintenant une filière de recyclage, il faut répercuter ces nouveaux processus de fin de vie pour les composants. La difficulté à ce niveau est d'avoir connaissance des processus de fin possible pour les composants dans un tel scénario de fin de vie. En effet, cela nécessite une modélisation générique des composants pour qu'ils soient réutilisables dans une variété de contextes différents.

### 2.3. Nouveau système proche

La définition d'un nouveau système proche est souvent le scénario utilisé pour la définition initiale d'un système. Par exemple, la définition d'un nouveau véhicule automobile n'est pas fait ex-nihilo et elle s'appuie sur le savoir-faire et les expériences passées de l'équipe de développement qui réutilise et adapte une partie des modèles des véhicules précédemment développés. Ainsi, ce scénario alterne l'évolution d'un système existant avec la réutilisation de composants pré-définis.

## 3. PRINCIPES DE L'EXTENSION ECOPLEX

L'extension Ecoplex vise à permettre à l'architecte système de pouvoir faire au plus tôt des évaluations environnementales du système en cours de définition. Ainsi, la modélisation d'impacts environnementaux a été

intégrée au métamodèle de Capella par Obeo<sup>2</sup> pour permettre une interaction avec les logiciels ACV via le format standard ILCD (*International Life Cycle Data*). La Figure 1 montre l'organisation globale des flux d'information implémentés.

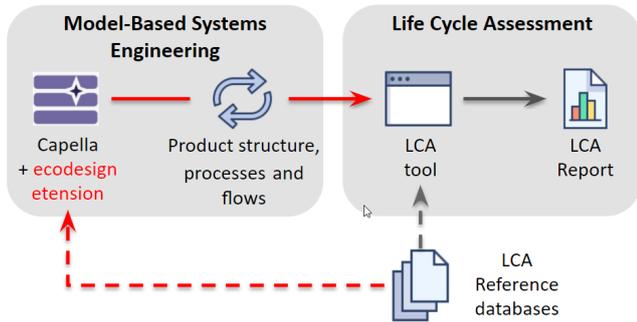


Figure 1 : Organisation de l'extension MBSE Ecoplex pour Capella

A l'aide de l'extension Ecoplex, la définition du système et de ses impacts environnementaux suit la méthode Arcadia, basée sur la définition du système selon les points de vue : besoins opérationnels, besoins systèmes, architecture logique et architecture physique.

### 3.1. Modélisation des cycles de vie

Les impacts environnementaux sont contextualisés dans des étapes du cycle de vie du système ou de ses composants. Ainsi, chaque élément du système comporte des descriptions de phase de cycle de vie qui sont elles-mêmes détaillées par des paramètres environnementaux. Ils peuvent être définis par des valeurs ou des formules. Le cycle de vie d'un système est structuré de manière générique en suivant l'ISO1404x. Il est défini formellement comme un diagramme d'état qui structure l'évolution du système et des sous-systèmes sur l'ensemble de leur cycle de vie, comme le montre la Figure 2. Cette figure illustre le cycle de vie créé par défaut lors de l'initialisation des données environnementales dans l'extension Ecoplex. Ce diagramme d'état est similaire à celui présent dans le langage UML et les états peuvent être décomposés pour décrire la dynamique d'évolution des états ou modes du système et de ses éléments.

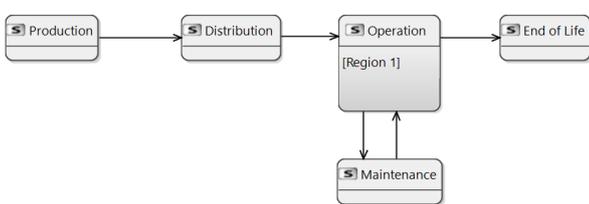


Figure 2 : Diagramme d'état générique de définition de cycle de vie

### 3.2. Modélisation et gestion des impacts environnementaux

Nous considérons que les impacts environnementaux sont directement associés à des étapes de cycle de vie. Tout élément de modèle peut se voir associer une étape du cycle de vie. Ainsi, les composants des nomenclatures logiques comme physiques peuvent se voir associer des impacts environnementaux de manière transitive en les définissant au niveau des étapes du cycle de vie de ces éléments. La Figure 3 présente un extrait du métamodèle de l'extension Ecoplex pour Capella.

Pour les phases de fabrication et de fin de vie, les paramètres environnementaux se basent sur des bilans massiques, comme pour les logiciels ACV. Du point de vue de la phase d'utilisation du système, l'enjeu principal est de définir la manière d'extraire et de regrouper les impacts environnementaux des éléments d'un système pour les exporter vers un logiciel d'ACV d'une manière générique. Ainsi, il faut définir au niveau global du système l'unité de groupement des impacts d'exploitation. Cette unité de groupement des impacts est à relier directement avec la définition de l'unité fonctionnelle qui quantifie la réalisation de la fonction principale du système. Par exemple, le nombre d'usages ou le temps d'usage peuvent quantifier génériquement la phase d'utilisation du système plutôt qu'une masse de matière consommée. Cela permet d'exprimer de manière plus souple l'agrégation à effectuer au niveau du système.

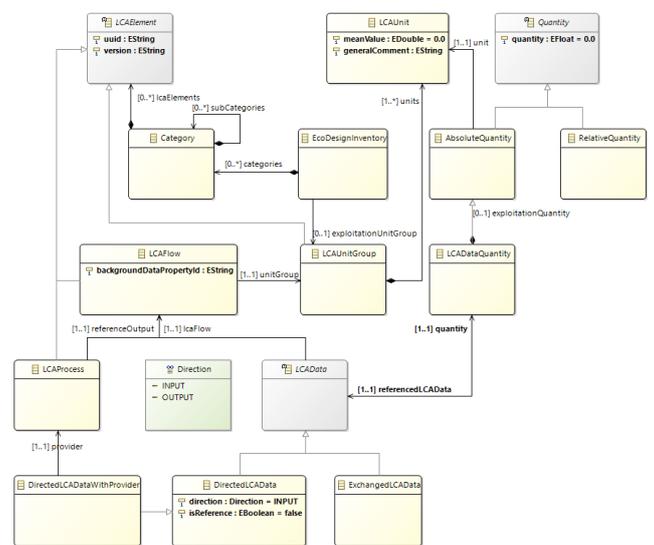


Figure 3 : Extrait du métamodèle de l'extension Ecoplex

### 3.3. Mécanismes de réutilisation de modèles

La plateforme Capella est basée sur les principes de l'ingénierie dirigée par les modèles (MDE : *Model Driven Engineering*) et propose un cadre de développement intégrant des mécanismes natifs de généricité et

<sup>2</sup> <https://www.obeosoft.com/fr/>

d'héritage dans la formalisation des modèles. Ainsi, il est possible de constituer des bibliothèques de composants qu'on peut importer lors de la définition d'un nouveau système.

La plateforme Capella facilite également la réutilisation de certaines parties de modèles en s'appuyant sur l'extension Kitalpha basée sur la définition de point de vues [10]. Cette extension intègre un mécanisme générique de copie de parties de modèles qui peuvent être ensuite répliquées dans d'autres contextes. Cela permet de définir des « macros » de réplification de modèles pour, par exemple, structurer la réutilisation des composants lors de leur intégration dans un système. La difficulté dans notre cas applicatif est d'identifier le périmètre des modifications à opérer pour intégrer de nouveaux composants. Nous nous sommes alors basés sur les mécanismes de réutilisation de la section 2, pour déterminer les types de lien à établir.

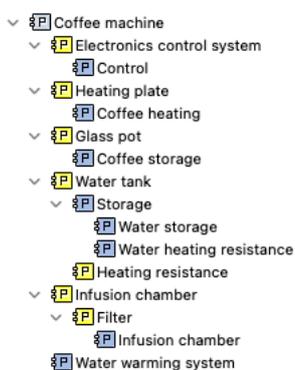


Figure 4 : Nomenclature simplifiée d'une machine à café modélisée dans Capella

#### 4. CAS APPLICATIF

Pour illustrer simplement ce travail, nous avons pris l'exemple de la reconception d'une machine à café. Nous cherchons à évaluer plusieurs scénarios d'évolution et de réutilisation de modèles. Nous disposons d'un modèle existant de cafetière électrique traditionnelle, qui chauffe de l'eau pour qu'elle se condense dans un filtre contenant du café moulu pour finalement stocker le café obtenu dans un bol en verre. La nomenclature simplifiée est présentée en Figure 4, en se basant sur la structure du système défini dans Capella. Nous nous sommes basés sur les données environnementales présentées sur le site Ecolizer<sup>3</sup>. Le cycle de vie global est présenté sur la figure 5.

Dans un premier temps, nous avons mis en œuvre une évolution du système, qui vise à changer le principe de solution associé à la fonction de maintien du café au chaud. Cela nécessite de remplacer le bol en verre par un thermos et de supprimer la plaque chauffante. Ces

modifications ont pu être mise en œuvre simplement, car les scénarios des étapes du cycle de vie, notamment la phase d'usage, n'ont pas été modifiés au niveau global.

Name	Quantity	Unit	Exploitation Qua	Exploitation	State	Norm. Abs. Exp.
☑ Coffee machine			1200.0	d		1200.0
↳ Production						
↳ Acrylonitrile-Butadiene-St...	1.0	kg			Production (Coffee mach...	
↳ Corrugated board boxes, p...	0.3	kg			Production (Coffee mach...	
↳ Polystyrene expandable gr...	0.01	kg			Production (Coffee mach...	
↳ Distribution						
↳ Container ship ocean, tech...	8000.0	kg SWU			Distribution (Coffee mac...	
↳ Small lorry transport, Euro...	50.0	kg SWU			Distribution (Coffee mac...	
↳ Operation			90.0 %			1080.0
↳ Make coffee						1080.0
↳ Electricity Mix, consum...	365.0	kWh			Make coffee (Coffee mac...	
↳ Clean filter						1080.0

Figure 5 : Définition du cycle de vie au niveau global système

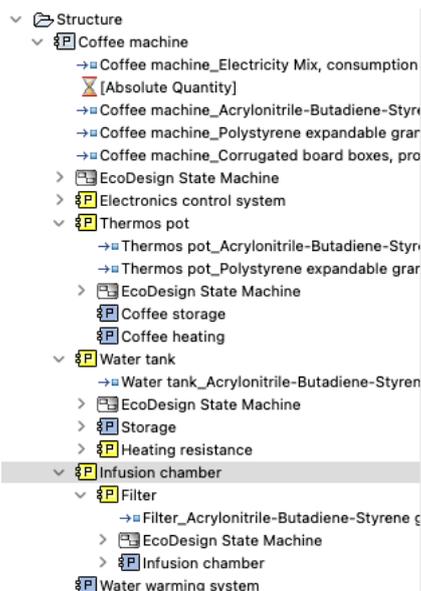


Figure 6 : Nouvelle architecture intégrant les impacts environnementaux

Nous avons voulu étudier la réutilisation de ce modèle dans le cadre d'une seconde évolution : définir une machine à café dont le filtre est réutilisable et non-plus jetable. D'un point de vue de l'architecture physique du système, Il faut donc remplacer le composant filtre existant par un filtre permanent lavable et réutilisable. Du point de vue de l'ACV, il faut remplacer le cycle de vie additionnelle sur les filtres consommés par des impacts environnementaux du filtre réutilisable, en les intégrant à chaque étape du cycle de vie. Dans ce cas particulier, cela nécessite de bien prendre en compte la modification de la formule pour calculer l'agrégation des impacts liés au filtre, qui sont maintenant calculés pour une durée d'usage plutôt qu'en nombre de filtres consommés. On passe ainsi d'un consommable à un élément interne du système. Cette modification plus complexe, n'a pu être généralisée en opération automatique, mais elle a pu être réalisée à la main. La figure 6 montre la nouvelle

<sup>3</sup> <https://www.ecolizer.be/design/9506/fiche> (Accès au 12/12/2022)

nomenclature intégrant les impacts environnementaux à chaque niveau système.

Une fois ces modifications effectuées, l'export de l'ensemble des données environnementales peut être effectué au format ILCD, ce qui génère une archive au format zip qu'il faut importer, par exemple dans OpenLCA pour mener une évaluation des impacts sur l'ensemble du cycle de vie qui a été généré depuis la description faite dans Capella. La figure 7 montre le résultat obtenu dans OpenLCA pour ce scénario de cycle de vie pour la machine à café.

## 5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté plusieurs mécanismes de réutilisation de modèles pour des données environnementales dans un environnement d'ingénierie système. Une partie de ces mécanismes sont intégrés à l'extension Ecoplex qui permet de développer de nouveau système en suivant la méthode Arcadia intégrée à l'environnement Capella. Ecoplex permet de lier au plus tôt les éléments de description d'un système avec des étapes de cycle de vie auxquels il est possible d'attacher des paramètres environnementaux. Ces derniers sont alors exportables vers des logiciels d'ACV.

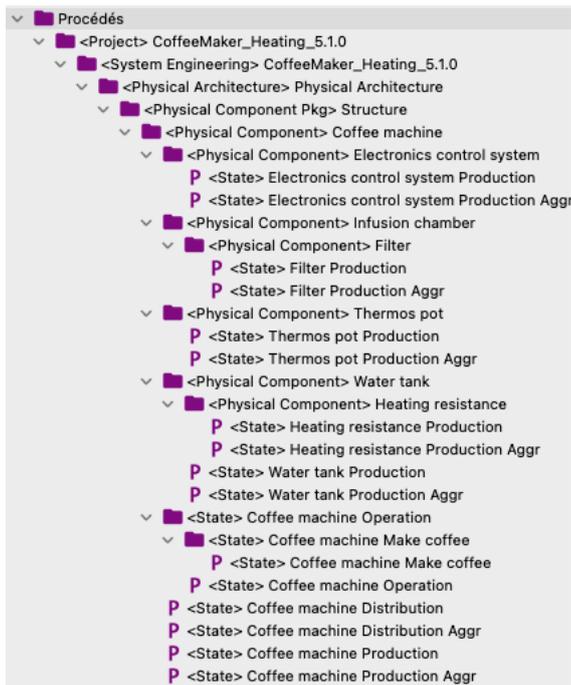


Figure 7 : Nomenclature de procédés dans OpenLCA générés à partir de Capella et Ecoplex

Plusieurs applications industrielles ont permis d'éprouver l'outillage développé et un exemple simplifié basé sur la conception d'une cafetière ont permis d'illustrer plusieurs scénarios de réutilisation de modèles.

Ce travail est une première tentative pour formaliser et généraliser les mécanismes de réutilisation pour des données environnementales dans un cadre d'ingénierie système. Plusieurs limites ont été rencontrées pour appliquer automatiquement des règles de réutilisation dans de nouveaux systèmes. C'est particulièrement le cas,

lorsque l'unité fonctionnelle évolue et que cela touche à la manière d'agréger les impacts environnementaux au niveau global.

Une autre piste reste encore à explorer sur la manière de définir des composants plus génériques quant à la définition des différentes alternatives connues pour chacune des étapes du cycle de vie. Actuellement, la philosophie des plateformes d'ingénierie système est de modéliser un système, pas un ensemble d'alternatives. La seule possibilité est d'utiliser le mécanisme d'héritage et de composants abstraits pour structurer des sortes de méta-composants.

## REMERCIEMENTS

Ce travail s'est déroulé dans le projet Ecoplex financé par la région Pays de La Loire, la région Bretagne et BPIFrance. Ce projet a impliqué les partenaires suivants : CapGemini Engineering, Efinor Sea Cleaner, Manta Innovation, LS2N, Obeo et Stirling Design International.

## REFERENCES

- [1] Di Noi, C., Ciroth, A., & Srocka, M. (2017). OpenLCA 1.7. *Comprehensive User Manual*, GreenDelta GmbH, Berlin, Germany.
- [2] Hunkeler, D., Vanakari, E. EcoDesign and LCA survey of current uses of environmental attributes in product and process development. *Int. J. LCA* 5, 145-151 (2000).
- [3] F. Francis, Environmentally conscious quality function deployment - A new approach for green manufacturing. *International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications*, Beirut, Lebanon, 2009, pp. 340-343.
- [4] Rio, M., Reyes, T. and Roucoules, L. (2010). A framework for eco-design: An interface between LCA and design process. *International Journal of Engineering*. 9.
- [5] McAloone, T.C., Pigosso, D.C.A. (2018). Ecodesign Implementation and LCA. In: Hauschild, M., Rosenbaum, R., Olsen, S. (eds) *Life Cycle Assessment*. Springer, Cham.
- [6] International Organization for Standardization. ISO/IEC 15288: 2002, *Systems Engineering--System Life Cycle Processes*, 2002.
- [7] Fet, A.M. and Keitsch, M. Systems engineering as a holistic approach to life cycladesigns. *Ocean Engineering* 62(2):1-9, 2013.
- [8] Roques, P. MBSE with the ARCADIA Method and the Capella Tool. In: *8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016)*. 2016.
- [9] Bézivin, J. and Gerbe, O. Towards a precise definition of the OMG/MDA framework. *Proceedings 16th Annual International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2001)*, 2001, pp. 273-280, doi: 10.1109/ASE.2001.989813.
- [10] Langlois, B., Exertier, D., & Zendagui, B. (2014, October). Development of modelling frameworks and viewpoints with Kitalpha. In *Proceedings of the 14th Workshop on Domain-Specific Modeling* (pp. 19-22).



## Penser la gestion d'actifs dès la conception Cas du matériel roulant ferroviaire

O. Malassé a,\*

<sup>a</sup> Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC) - EA 4495  
Arts et Metiers Institute of Technology, Université de Lorraine, LCFC, HESAM Université, F-57070 Metz, France

\* e-mail : olaf.malasse@ensam.eu

### 1. INTRODUCTION

La complication et la complexité croissante des systèmes rend délicate et probablement incomplète l'évaluation de leurs propriétés structurelles et comportementales. L'ingénierie de conception détaillée, est la dernière phase avant confrontation au réel, à la libération des contraintes virtuelles (exigences) oubliées ou mal définies [1]. Aussi se généralise l'usage de méthodes formelles, d'ailleurs recommandé par certaines normes, pour la vérification en phase de conception des systèmes critiques [2]. Traditionnellement, l'approche permet d'identifier les points critiques et évaluer la performance fiabiliste après validation opérationnelle des paramètres [3], l'analyse de la sécurité [4]. La planification de la maintenance [5] et la stratégie d'entretien des composants n'influence pas seulement la disponibilité des véhicules ferroviaires, mais également la performance opérationnelle et la rentabilité de l'opérateur [6]. L'intégration des études LCC (Life-Cycle Cost) et RAMS (Reliability, Maintainability, Availability and Safety) [7] et de leurs impacts financiers courts et long terme est une exigence à couvrir. La formalisation du lien économique entre les coûts d'entretien et les volumes d'équipements renouvelés est une préoccupation majeure des gestionnaires de réseaux [8].

Dans cet article, nous allons nous intéresser à la modélisation de système de systèmes pour l'optimisation des actifs, dès la phase de conception. Pour aborder la conception des SoS (System of Systems) [9], l'approche intégrée RCPBP (Risk, Configuration, Performance, Policy, Business management), adaptation à l'ingénierie système de l'ISO 10040-FCAPS (Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security) fait explicitement référence aux aspects politique et financier [10]. Il est vrai que la performance

opérationnelle est fortement contrainte par la politique mise en œuvre au niveau tactique, elle-même s'attachant à optimiser la productivité des matériels et infrastructures définies au niveau stratégique. D'où l'importance de la prise en considération des exigences économiques (purements financières à court terme, écoresponsables et géopolitiques à long terme) dès la phase de conception. De nombreuses normes couvrent ces multiples aspects : ISO/IEC 15288 (ingénierie des systèmes et du logiciel - processus du cycle de vie), NF/EN 50126 (FMDS - Applications ferroviaires), IEC 61703 (expressions mathématiques pour la fiabilité, la disponibilité, la maintenance et les conditions de support de maintenance), ISO 55001 (gestion des actifs).

Un modèle de composition du système ferroviaire (figure 1) peut s'inspirer du modèle SGAM (Smart Grid Architecture Model) [11] à plusieurs composantes :

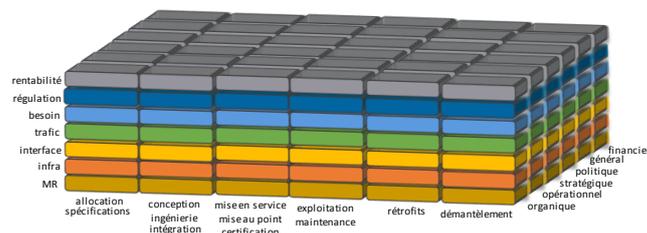


Figure 1 : Modèle de composition du système ferroviaire

- Systèmes du système ferroviaire : MR (constructeurs, EF), infrastructure (constructeurs, GI), interface (gares, commercial), trafic (régulation de trafic, organisation, ART), besoin (AOT), régulation (EPSF, pression publique, politique), rentabilité (citoyen/client, taxes et impôts).

- Processus du cycle de vie auxquels doit être ajouté la planification & structuration dudit cycle, les cycles de vérifications, ainsi que la gestion et l'évaluation/audits.

- Intérêts selon les points de vue : financier (capitalistique), général (enjeux vitaux, qualité de service sociétale), politique (puissance, influence, souveraineté), stratégique (mobilité, résilience, durabilité), opérationnel (efficacité, performance, interopérabilité, endurance), auxquels on peut ajouter la recherche des propriétés d'adaptabilité, frugalité, rusticité.

De type dirigé/reconnu, le matériel roulant est lui-même un système de systèmes et le suivi des exigences n'est pas intuitif. Traditionnellement, la vérification s'effectue axe par axe. Les outils actuels permettent le suivi des exigences sur au moins 2 axes. Ici après allocation des fonctions, l'impact des choix technologiques et d'architectures, associés à une politique de maintenance intégrant des aspects opérationnels, sont évalués avec leurs aspects financiers. On obtient ainsi un indice sur la qualité de service et l'acceptabilité économique sociétales du projet. Le maintien en conditions opérationnelles des systèmes à longue durée de vie est conditionné par des choix imposés par des causes structurelles, intentionnelles, conjoncturelles, d'influences. Les imperfections organiques peuvent impacter fortement le niveau opérationnel et l'efficacité économique ne peut être évalué qu'après mise à l'échelle des choix organiques et opérationnels.

Après définition des interfaces pour une modularité du développement, les ingénieurs de conception doivent pouvoir disposer d'un outil intuitif pour la vérification des propriétés éco-fiabilistes afin d'y intégrer le plus simplement leurs décisions. Cet outil doit permettre l'expression facile des dépendances, la localisation des points critiques et la personnalisation syntaxique. En plus de la traditionnelle vérification des performances fiabilistes et tests de non régression, il est recherché une capacité d'analyse explicative de l'impact des choix de conception sur la viabilité économique long terme du projet, complétée par la possibilité d'une analyse de la robustesse du modèle économique à la variabilité des coûts des composants et consommables.

## 2. CONTEXTE

L'optimisation de la gestion d'actifs pour des systèmes compliqués et complexes, multi-physiques (multiples systèmes mécaniques, pneumatiques, électrotechniques, embarqués réticulés en interaction) avec des aspects fiabilistes (disponibilité, politique de maintenance) et économiques (immobilisation de capitaux, coûts de possession) reste une affaire d'experts, où le détail a rarement sa place. S'y côtoient des exigences :

- internes endogènes (surveillance, contrôle-commande) et exogènes (connectivité clients),
- externes (position, autorisation de mouvement, maintenance, interactivité clients, hacking),

exigences de sécurité, de performance, de confort, mais aussi opérationnelles et économiques. Le système

sociotechnique en est la concrétisation, le germe de la performance économique. L'activisme commercial ne peut que composer avec cette réalité, même si certaines politiques d'influence ou tarifaires peuvent se révéler fort rentables. Mais au tassement de leurs effets, le fondamental réapparaît. Alors les capacités à la réflexion, à la rétro-ingénierie se construisent sur l'explicitabilité de l'influence de décisions (retour d'expériences à court terme par simulation, à moyen terme par expertise, à long terme par bibliographie).

L'environnement de méta-modélisation retenu (*Petro* du package *Simulation* de GRIF® - GRaphiques Interactifs pour la Fiabilité, propriété de TotalEnergies et utilisée sous licence - voir annexe), multi-flux, utilise un moteur de calcul par simulation de Monte-Carlo (MOCA-RP) et renvoi un grand nombre de résultats post-traités quant à la disponibilité de production et production par intervalle de temps, la contribution de chaque sous-système aux pertes de production, aux statistiques sur les durées et les causes des arrêts, aux coûts (CAPEX, OPEX)... L'objectif est de challenger diverses hypothèses conceptuelles afin de comprendre leurs impacts sur les différents plans performatifs, à la recherche d'un compromis économique réellement intéressant.



Figure 2 : RGV 2N (2 motrices & 8 remorques)

L'étude de cas retenu est un matériel roulant ferroviaire proche d'une rame TGV (2 motrices encadrant 8 remorques) (figure 2). L'architecture système a été décomposée en sous-systèmes : système embarqué (C2, sécurité), électrotechnique (traction et auxiliaires), pneumatique (frein, suspensions, assistance portes), confort (ambiance passagers), mécanique (caisses, bogies, roulements).

## 3. MODELISATION

Comme pour toute ingénierie système, plusieurs domaines métiers se côtoient. Basé sur une bibliothèque de modèles de composants, le modèle global se crée par compositions en fonction du besoin. L'intégration peut se faire suivant un ou plusieurs axes. Ainsi, on peut s'intéresser au développement d'une rame, à l'intégration du matériel roulant dans son environnement (infrastructure, trafic) pour des besoins d'homologation (compatibilités) ou valider des exigences de performances, ou à son coût de possession politique et économique (figure 3). Nous nous intéressons ici à la strate *Matériel Roulant*, suivant les axes processus de cycle de vie (exigences, conception, exploitation, maintenance, rétrofit) et les points de vues (organique, opérationnel, financier) et leurs interactions.

Utiliser l'environnement *Petro*, destiné à la modélisation de flux (conservatifs), nécessite d'accepter quelques approximations quant au modèle (adaptation sémantique). Le travail est ici prospectif et nous ne souhaitons pas consacrer du temps à des modifications de l'outil. L'objet de base *Petro* intègre des composantes

organiques, opérationnelles, financières et contient un ensemble de champs concernant la capacité, le taux de défaillances, la durée moyenne de réparation, les types de défaillances, les causes communes de défaillances, l'usage éventuel de sous-systèmes (pour les fonctions support) et de modes dégradés et pour chaque type de défaillance : la politique de maintenance (équipes et stocks concernés), les coûts (composants, stockages, pannes), les types de maintenance (niveau, préventive...).

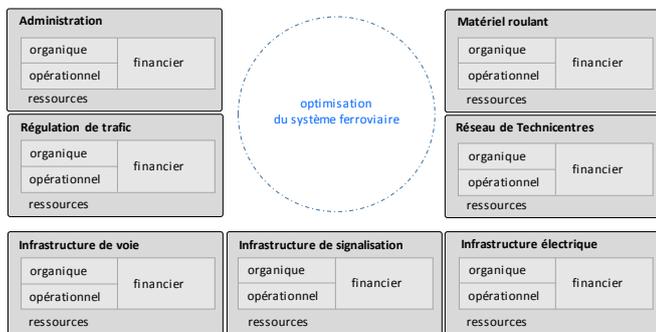


Figure 3 : Interactions au sein du système ferroviaire

Dans notre cas, chaque sous-système métier est mono-flux. Le système électrotechnique est parcouru par un flux représentant la puissance nécessaire (en kW) pour accomplir l'ensemble de missions. Le système pneumatique voit transiter un débit d'air comprimé nécessaire à l'alimentation des fonctions pneumatiques (freinage, assistance portes...). Le système mécanique est, plutôt sensible à un usage, est parcouru par un flux kilométrique représentant un roulement relevant d'une ou plusieurs rames. Le confort passager relève d'un flux en pourcent de la pleine fonctionnalité des systèmes dédiés. Quant aux systèmes embarqués incluant des fonctions sécuritaires, ils sont intégrés sous forme de systèmes supports. Une option multi-flux aurait pu être retenue, avec mise en situation topographique des composants.

Notre parti pris est une modélisation de la RGV 2N en 5 parties (figure 4) :

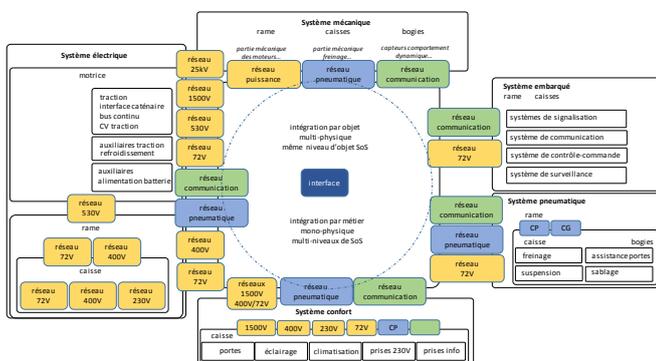


Figure 4 : Interactions au sein du système rame

- Systèmes embarqués : intègre les capteurs des différents sous-systèmes, les unités de traitement de l'information, les réseaux de communication. On y retrouve les systèmes d'anti-enrayage des essieux et de pilotage, notamment le système de contrôle-commande et de signalisation avec ses multiples capteurs. Les états

de ces systèmes sont intégrés dans les pré-actionneurs par des dépendances.

- électrotechnique : contient les chaînes de traction avec à partir du captage par pantographe, les disjoncteurs monophasé (DJM) et continu (DJC), un transformateur à sorties multiples, un ensemble de ponts redresseurs (PMCF) et filtres associés, les onduleurs moteurs de traction (CVT) et des auxiliaires (refroidissement du système de traction embarqué dans les 2 motrices : ventilation et pompes à eau des 4 blocs moteurs, ventilation des 8 packs rhéostatiques et des 8 moteurs de traction, ventilation et pompes à huile des 2 transformateurs) (figure 5). Les flux de sortie représentent la puissance réellement disponible en fonction de l'état des composants et de la capacité résiduelle des auxiliaires. Les réseaux électriques de bord avec des réseaux 530V et 72V, ainsi qu'une liaison 25kV pour et entre les motrices, les départs des réseaux 1500V, 530V (redondé) vers la rame. Au sein du tronçon voyageur coexistent des réseaux 400V et 72V. En caisse, on dispose de dérivations 1500V, 400V, 72V et est présent un convertisseur 230V.

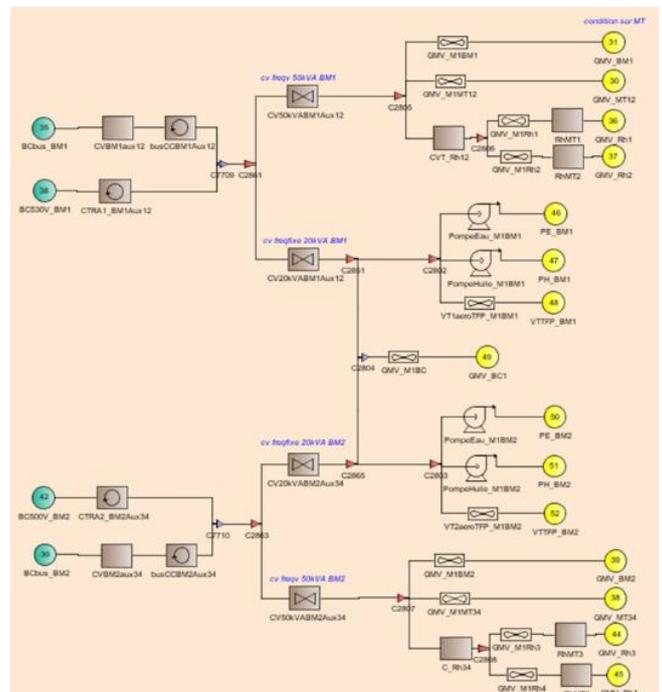


Figure 5 : Détail partiel des auxiliaires de traction

La commande des convertisseurs est considérée par la dépendance à la partie système embarqué (usage d'utilitaires sous Petro). Les capteurs utilisés par cette partie (courant, tension) sont reportés dans la partie système embarqué.

- Pneumatique : comprend, par motrice, la production d'air comprimée (moteur, compresseur, groupe de filtrage de l'air, un réservoir principal), le système de pilotage de la CG (conduite générale), les départs des réseaux rame CP (conduite principale), CG et réseaux caisse CP/CG. Il existe une dérivation par caisse avec 1 réservoir auxiliaire par essieu et son système de freinage, l'alimentation de la suspension secondaire pneumatique, l'assistance à l'ouverture des portes

intérieures et extérieurs et pour les motrices, un système de sablage des roues des essieux externes.

La commande des électrovalves est considérée par la dépendance à la partie système embarqué, de même que les capteurs électriques utilisés par cette partie (hors capteurs et actionneurs pneumatiques).

- Confort : comprend les éléments participant au ressenti de l'expérience voyageur. Cela va de la propreté et état des salles voyageurs (espace et sièges), de la performance résiduelle du chauffage/climatisation (figure 6), de l'éclairage, des prises de commodité (électrique et réseau), de l'assistance à l'ouverture des portes.

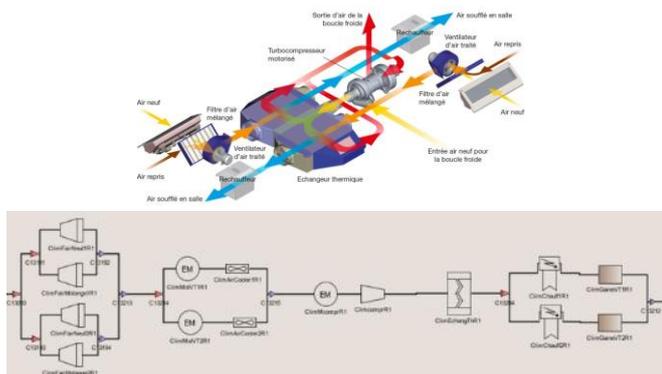


Figure 6 : système de climatisation (système et modèle)d'une caisse

- Mécanique : son fonctionnement est conditionné par la performance résiduelle des autres parties. La partie purement mécanique ceint les 10 structures de caisses dont 2 avec une structure avant et les carénages, l'intérieur des caisses (structure et aménagements), les 13 bogies avec leur intercirculation, les 26 essieux avec les réducteurs sur les bogies moteurs et les disques de freins sur les bogies porteurs. L'aspect de la rame est pris considération avec l'usure de l'apparence et le risque de tags.

En plus des composantes organiques précitées, le modèle aborde les aspects opérationnels par l'usage (flux d'entrées) et les processus de maintenance. On y traite de la gestion des équipes dédiées, de la gestion des stocks de pièces et sous-systèmes. Des stratégies de maintenance (curative, préventive, éventuellement prédictive). La politique de maintenance a en effet une grande influence sur les coûts (marginaux, disponibilité du système), comme le montre les travaux de Xu & all [12] (figure 7), dont le graphique décrit les coûts par unité de temps de différentes modalités de maintenance. On y constate que la surveillance et l'inspection périodique permettent de stabiliser les coûts de maintenance.

L'intégration des coûts se fait naturellement par une affectation d'une valeur à tous les composants et actions. Les pertes sur défaillance peuvent également être prise en compte, de même que les taxes et autres charges de production (location de sillons, consommation énergétique, personnels de bord, usure, immobilisation), de maintenance (occupation des ateliers, personnels

mobilisés, immobilisation capitaux - stockage et personnels)... Il existe une taxe (TFP) sur le matériel ferroviaire roulant utilisé sur le réseau ferré national pour les opérations de transport de voyageurs [article 1599 du code général des impôts (CGI)] dans le cadre de l'imposition forfaitaire sur les entreprises de réseaux (IFER) : 38.296€ pour les motrices de matériel à grande vitesse et 10.941€ pour leurs remorques (transport de voyageurs à grande vitesse). Le montant de la redevance sillon est fixé par la réglementation européenne 2012/34 (article 31.3) qui prévoit que les redevances perçues pour les sillons sont égales au coût directement imputable à l'exploitation du service ferroviaire > 5€/km. Avec un taux de remplissage moyen de 75%, le prix moyen du trajet/km est de l'ordre de 0.16€, auquel il faut ajouter le coût de l'énergie.

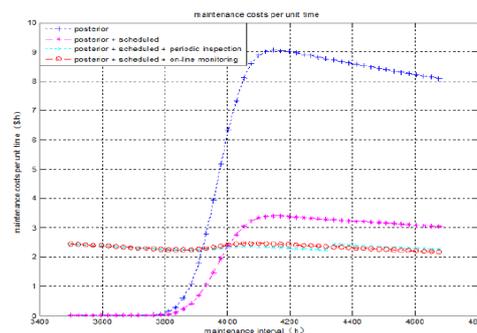


Figure 7 : Influence des politiques de maintenance

L'organisation de la gestion documentaire est intégrée à GRIF.

#### 4. RESULTATS

Pour notre étude, on reconstitue un roulement TGV POS (Paris - Ostfrankreich - Süddeutschland) avec un mix d'allers/retours entre Paris, Strasbourg, Mulhouse, Francfort et Munich, avec repos hebdomadaire en Technicentre à Paris et repos nocturnes. Les maintenances s'effectuant préférentiellement durant ces phases de repos. Le modèle d'intégration, comprenant la partie mécanique, dont l'entrée est constituée par le roulement (service assuré sur plusieurs journées) vérifie que la mission est réalisable.

Le travail de récolement et de captation des données se révèle laborieux, ainsi si une partie des données est possiblement fidèle, l'autre est le fruit d'une évaluation *au doigt mouillé*. Probablement proche d'une certaine réalité, elle gage de manière conséquente les résultats.

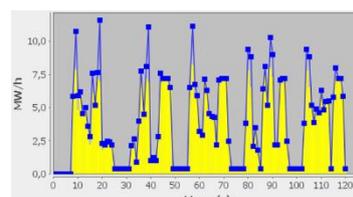


Figure 8 : Performance fiabiliste de la partie électrique

De base, Petro fournit de nombreuses données pouvant être aisément complétées. Les productions moyennes versus les productions moyennes de

référence (réelle versus le besoin), la disponibilité de production des sous-systèmes permettent de vérifier l'adéquation des performances fiabilistes au besoin (figure 8). Les nombres, types et durée des incidents dus aux composants (pannes critiques et modes dégradés) pointe les points faibles de la conception. L'analyse est affinée par composant avec le type de défaillance, les temps de fonctionnement par mode, d'attente ressources et de réparation, les arrêts SIMOPS (entraînés par des interventions externes au sous-système), les équipes de maintenance et stocks concernés. Des informations détaillées sur les personnels et les stocks complètent le tableau. Reste les détails économiques avec les coûts, revenus, bénéfices et flux de trésorerie globaux ou au fil de l'eau.

L'approche systémique pour la gestion prévisionnelle d'actifs, intégrant les aspects fiabilistes (au sens de la FMDS) permet la liaison avec les aspects économiques et financiers. L'architecture du modèle est proche d'un modèle de comportement dynamique, ce qui pourrait faciliter son intégration dans le processus de conception global.

Comme classiquement en ingénierie (et dans la vie) il n'existe pas un optimum, mais un ensemble dense de compromis apparemment acceptables, le choix final relève de la politique. Éminemment humain, ce choix implique que l'homme soit dans la boucle et qu'il dispose même dans un cadre de rationalité limitée [13], d'éléments explicatifs conceptualisables. L'optimum peut consister en la minimisation du coût de possession. Comme l'évoque Yvon Pesqueux [14] «*Cela renvoie à la mise en œuvre de réductions drastiques des coûts par la gestion de la qualité, l'analyse de la valeur consistant à examiner un produit ou un service sous l'angle de ses fonctionnalités afin de rationaliser son élaboration, du design to cost c'est-à-dire de l'étude du produit de sa conception à son coût ; ce sont aussi la mise en œuvre de logiques de raisonnements en coûts cibles et de conception à coût objectif, qui visent à dominer les coûts dès la conception, méthode considérée comme plus pertinente que les méthodes traditionnelles de diminution des coûts constatés*». L'affaire n'est pas simple, une somme d'optimums locaux n'étant pas garante de l'efficacité des capitaux engagés. L'objectif peut être autre, comme par exemple, l'équilibrage de la répartition des coûts sur la durée de possession afin de régulariser la charge de travail des ateliers et personnels (et des flux financiers), fluidifier la circulation des stocks, pas forcément d'optimiser le coût global de possession. Ou encore, en pure langue de bois : *renforcer la résilience de l'entreprise en privilégiant la génération de cash-flow, tout en maintenant le client au centre des priorités* [Renault, 2020] (après tout, une entreprise a bien le droit d'user de communication pour rassurer ses investisseurs et la sémantique n'est pas exclusive d'un domaine). Plus prosaïquement, il peut prendre l'apparence d'une optimisation du nombre de rames à engager sur un roulement (investissement, coûts de maintenance, de

gestion) par une meilleure gestion de la disponibilité sous contrainte de coût.

## 5. CONCLUSION

Il s'agit d'un travail prospectif pour évaluer l'apport de l'approche. Non complet, le modèle n'inclut pas encore des politiques évoluées de maintenance. L'usage de flux : puissance électrique disponible pour la traction et les auxiliaires, indice de confort voyageur, kilomètres à parcourir, modulés par l'état des composants ne pose pas de problèmes particuliers. Il existe plusieurs manières de gérer les dépendances. Pour les tags, par exemple, le délai d'intervention doit être inférieur à 3 jours (pour préserver l'intégrité du revêtement), on utilise des SIMOPS pour immobiliser la rame. L'ensemble des modalités de maintenance n'est pas encore implanté, un certain nombre d'opérations peuvent être et sont souvent couplées. L'exhaustivité des cas, comme souvent, n'est pas envisageable, mais une analyse de sensibilité à leur limitation pourrait être intéressante.

L'analyse sur scénarii intégrant l'évolution des politiques financière (inflation), économique (taxations, souveraineté) modulant l'intérêt de la mobilité ferroviaire permet d'évaluer la soutenabilité d'un projet et les conditions de son amortissement. Ces choix impactent fortement l'économie de la mobilité qui se conçoit dans le temps long (amortissement sur plusieurs décennies). Ce type de modèle, outre la gestion des actifs, peut être utilisé pour évaluer la robustesse de la politique de maintenance à des perturbations de la chaîne logistique (désorganisation des transports suite à la politique anti-Covid en Chine, blocage du canal de Suez par un porte-conteneurs, pénurie de composants électroniques...). L'impact de l'organisation des Technicentres (planification de la maintenance) [15] sur la productivité des actifs et la qualité de la maintenance (avec ses coûts temporels, financiers, opérationnels) pourraient également être intégrés au modèle. Renseigner les paramètres se révèle une gageure : nombres de métiers interviennent (électrotechniciens, mécaniciens, gestionnaires de Technicentres, exploitants...).

Dans cette première phase, on s'est concentré sur la modélisation. Les questions en suspens concernent l'optimisation multicritères pour une aide à la décision. Le nombre d'entrées est important, il existe un mode de fonctionnement par lot qui doit pouvoir être utilisé pour les calculs, suivi d'un processus de classification et d'une fabrication de paramètres de synthèse pour des indicateurs de performances appréhendables.

La vision stratégique est souvent en tension avec les contraintes opérationnelles et organiques. La dimension stratégique est fondamentalement différente des exigences opérationnelles et organiques. Une vision long terme est un pari (gagnant ou perdant) parfois hors champ de visibilité temporelle. La temporalité des échelons organiques et opérationnels est fortement contrainte par des aspects politiques et financiers qui

peuvent évoluer/changer dans le temps (conditions économiques, accessibilité aux matières premières et aux technologies, coût de l'énergie et de l'eau, accès au crédit, qualité des formations, capacité de recrutement, paupérisation de la société...). En conséquence, ce type d'analyse ne relève pas uniquement de la phase de conception (validation de choix), mais d'un processus prospectif sur les évolutions nécessaires du matériel, de la structuration opérationnelle, des approvisionnements.

## REMERCIEMENTS

Alain Jeunesse, Alain Bonnet, Fabrice Hickenbick (SNCF), Cyrille Folleau (SATODEV).

## ANNEXE

La suite logicielle GRIF ([grif.totalenergies.com](http://grif.totalenergies.com)) est composé de 3 packages et de 12 modules (figure 9) :

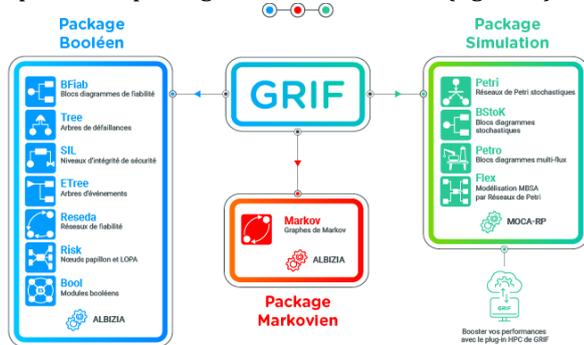


Figure 9 : Suite logicielle GRIF

Le Package Simulation comprend aujourd'hui 4 modules : *Petri* (modélisation par réseaux de Petri stochastiques à prédicats), *BStoK* (construction de blocs diagrammes stochastiques utilisant des bibliothèques de composants basées sur les réseaux de Petri), *Petro* (modélisation de systèmes multi-flux orientés sur les activités de procédés), *Flex* (élaboration de diagrammes multi-flux avec possibilité de créer ses propres prototypes en réseaux de Petri).

## ACRONYMES

AOT : Autorité organisatrice de transport  
 ART : Autorité de régulation des transports  
 C2 : Contrôle-Commande  
 CAPEX/OPEX : capital expenditure/operational expenditure  
 EF : Entreprise Ferroviaire (exploitant)  
 EPSF : Établissement public de sécurité ferroviaire  
 GI : Gestionnaire d'Infrastructures  
 MR : Matériel Roulant  
 RGV 2N : Rame Grande Vitesse à 2 Niveaux (Euroduplex)  
 SIMOPS : Simultaneous operations  
 Technicentre : Atelier de maintenance SNCF  
 TFP : Taxes sur les facteurs de production

## RÉFÉRENCES

- [1] Maier MW, The Art of Systems Architecting, CRC Press, 2009, ISBN 9781420079135.
- [2] Sun P, Ingénierie de modèle pour la sécurité des systèmes critiques ferroviaires - Model based system engineering for safety of railway critical systems, IFSTTAR/COSYS/ESTAS, doctorat SPI 072, 2015.
- [3] Morant Estevan A, Dependability and Safety Evaluation of Railway Signalling Systems Based on Field Data, doctorat Luleå University of Technology, 2015, ISBN 978-91-7583-450-4.
- [4] Macii D, Dalpez S, Passerone R, Corra M, Avancini M, Benciolini L, A safety instrumented system for rolling stocks: Methodology, design process and safety analysis, Elsevier, Measurement, n°67, pp 164-176, 2015.
- [5] Boliang L, Jianping W, Ruixi L, Jiayi W, Hui W, Xuhui Z, Optimization of high-level preventive maintenance scheduling for highspeed trains, Elsevier, Reliability Engineering and System Safety, n°183, pp 261-275, 2019.
- [6] Eisenberger D, Fink O, Assessment of maintenance strategies for railway vehicles using Petri-nets, Elsevier, Transportation Research Procedia, n° 27, pp 205-214, 2017.
- [7] Calle-Cordón A, Jiménez-Redondo N, Morales-Gámiz FJ, García-Villena FA, Garmabaki AHS, Odelius J, Integration of RAMS in LCC analysis for linear transport infrastructures. A case study for railways, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017.
- [8] Antoni M, Meier-Hirmer C, Economic correlation between maintenance and regeneration - optimisation of maintenance strategies for tracks, signalling equipment and overhead line components. 8<sup>th</sup> World Congress on Railway Research (WCRR 08) Seoul (Korea), 2008.
- [9] DASD (Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition & Sustainment), Systems Engineering Guide for Systems of Systems, version 1.0, US Department of Defense (DoD), Washington DC (USA), <http://www.acq.osd.mil/se/docs/SE-Guide-for-SoS.pdf>, 2008.
- [10] Gorod A, Sauser B, System-of-Systems Engineering Management: A Review of Modern History and a Path Forward, IEEE Systems Journal, Vol. 2, n° 4, december 2008.
- [11] Neureiter C, Engel D, Uslar M, Domain Specific and Model Based Systems Engineering in the Smart Grid as Prerequisite for Security by Design, Electronics, [www.mdpi.com/journal/electronics](http://www.mdpi.com/journal/electronics), pp 5-24, 2016.
- [12] Xu X, Fan S, Cao J, Research on the algorithm of maintenance interval based on MCMC, 2014 Prognostics and System Health Management Conference, PHM-2014 (Hunan).
- [13] Tran L, Herbert Simon et la rationalité limitée, La Découverte, Dans Regards croisés sur l'économie, n°22, janvier 2018.
- [14] Pesqueux Y., Organisations : modèles et représentations, PUF, 2002.
- [15] Mira L., António R. Andrade AR., Castilho Gomes M., Maintenance scheduling within rolling stock planning in railway operations under uncertain maintenance durations, Elsevier, Journal of Rail Transport Planning & Management, V. 14, June 2020, 100177.

# Réalité Augmentée en enseignement des Sciences pour l'Ingénieur : Application au réglage des systèmes de production

Y. Quinsat<sup>a,\*</sup>, K. Godineau<sup>a</sup>, V. Gourcuff<sup>b</sup>, I. Vasques<sup>b</sup>

<sup>a</sup> LURPA, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette, France.

<sup>b</sup> IUT de Cachan, Université Paris-Saclay, 94230 Cachan

\* e-mail : yann.quinsat@ens-paris-saclay.fr

## 1. INTRODUCTION

Les sciences pour l'ingénieur ont pour finalités le développement d'un ensemble de concepts et de connaissances nécessaires aux métiers de l'ingénieur. Les aspects étudiés vont de la conception à la réalisation de systèmes pluritechnologiques dans le but de répondre aux besoins de l'Homme. Il ne s'agit pas uniquement d'une juxtaposition de différentes disciplines (mécanique, automatique, électronique, thermodynamique), mais aussi d'un ensemble de démarches d'analyse et de mise en œuvre identitaires à cette discipline.

Dans le domaine des sciences pour l'ingénieur, les savoir-faire tiennent une place importante tant pour la compréhension des objets d'études que pour la confrontation au réel des modèles utilisés. Ils sont nécessaires pour la conduite de nombreux projets, permettant une autonomie accrue des étudiants pour la conduite d'essais et de validations. Or, les besoins de formation à des concepts et outils nouveaux associés à une durée de formation bornée, contraignent fortement le temps disponible pour la formation aux savoir-faire liés à la manipulation de systèmes.

En parallèle, les travaux d'ingénierie actuels s'inscrivent dans le concept de l'industrie 4.0 (industrie du futur) issu de la convergence entre le monde virtuel et le monde réel. L'un des aspects technologiques de cette industrie du futur concerne la réalité augmentée (RA). La réalité augmentée fait partie du continuum Réalité-Virtualité et est considérée comme un outil de réalité mixte [1]. Le but de cette technologie est de mettre en scène le monde virtuel sur un écran et de permettre des interactions avec le monde réel. Ainsi, la réalité

augmentée fournit en temps réel une couche d'objets générée par l'ordinateur qu'elle superpose à l'objet physique réel. Les objets virtuels apparaissent alors dans le même espace que les objets du monde réel. Apparue au début des années 1990, les champs d'application de la réalité augmentée sont en forte augmentation, en particulier dans le domaine de la fabrication [2]. Dans le domaine de la réalité augmentée, on distingue quatre grandes classes en fonction du matériel utilisé :

- Système de Projection : le monde virtuel est projeté sur le monde réel ;
- Écran portable : des supports de type tablette ou smartphone sont utilisés pour superposer l'acquisition du réel via une caméra et le virtuel ;
- Écran fixe : des caméras associées à des ordinateurs fixes sont utilisées pour superposer l'acquisition du réel via une caméra et le virtuel ;
- Lunettes : des systèmes holographiques affichent le monde virtuel dans le champ de vision de l'utilisateur.

Cette étude a pour objectif de développer, étudier et évaluer l'utilisation de la RA dans certaines activités pratiques en Sciences pour l'Ingénieur. Il s'agit en partie de pouvoir proposer des contenus utilisables sur tablette et lunettes afin de favoriser : l'autonomie des élèves, l'appropriation de concepts de haut niveau ou encore d'accompagner les groupes d'élèves ayant le plus de difficultés lors de ces activités pratiques. Cela peut concerner simplement le transfert de protocoles existants, dans un environnement de RA, facilitant le démarrage des activités pratiques ; cet apport est par exemple actuellement réalisé en industrie dans le domaine de la maintenance<sup>1</sup> et pourrait se transférer au domaine de l'enseignement. Mais il est plus pertinent

<sup>1</sup> <https://youtu.be/qpLBDds9ywc> accès le 01/11/2022

dans le cadre des enseignements effectués dans notre établissement d'utiliser les représentations en RA pour aborder des notions complexes (représentation de contraintes lors d'essais matériaux, illustrations de champs magnétiques, modification de repères lors du mouvement de solides, anticipation de collisions, etc.). De façon plus globale, dans ce projet, il s'agit aussi d'évaluer la pertinence de ces outils pour les apprentissages, d'identifier les groupes d'étudiants ainsi que les domaines disciplinaires à privilégier.

## 2. CONTEXTE DE LA RA DANS L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

La facilité d'accès aux technologies de RA, en partie due à une baisse des coûts et une simplification de l'utilisation, s'est grandement améliorée. Ainsi, les activités en RA augmentent fortement ces dernières années, et les formations en RA dans les universités commencent à apparaître même si elles ne sont pas très présentes en France [3]. Le projet européen Erasmus plus AR-FOR-EU<sup>2</sup> recense les formations universitaires disponibles dans ce domaine, les éléments clés de ces formations et définit les compétences nécessaires aux spécialistes de RA ainsi que les domaines d'emplois.

Le domaine de l'enseignement fait partie des domaines privilégiés pour l'utilisation de la RA, en particulier dans le cadre des activités pratiques. Les travaux pratiques, qui sont courants dans l'enseignement des sciences, semblent être particulièrement adaptés à l'application de la RA. En effet, les apprenants doivent interagir avec des objets physiques (c'est-à-dire du matériel d'expérimentation) d'une part et des objets virtuels (c'est-à-dire des données de mesure) d'autre part [4]. L'utilisation de la RA dans l'enseignement des activités pratiques permet d'améliorer grandement les compétences expérimentales des étudiants [5], mais permet aussi [6,7] :

- d'augmenter la motivation et l'intérêt des étudiants ;
- de favoriser l'acquisition de compétences dans le domaine de l'investigation de solutions ;
- de promouvoir et de développer la pensée critique et la capacité à résoudre les problèmes.

La RA ne semble pour autant pas limitée aux aspects pratiques, mais aide aussi à améliorer l'apprentissage de concepts théoriques (fonctionnement d'un circuit électrique [4], champs magnétiques et ligne de champs [8]).

L'un des principaux freins à l'acceptation de la RA par les étudiants concernait la lenteur des affichages et les erreurs des systèmes de positionnement [9], ce qui est en partie levé avec les évolutions récentes du matériel. Ainsi, depuis les années 2012, le nombre d'études sur l'utilisation de la RA en enseignement a fortement augmenté [10,11]. Ces travaux académiques se sont développés notamment grâce à l'augmentation des offres

de prestataire<sup>34</sup> et de logiciel dédiés<sup>5</sup>. Néanmoins, la grande majorité de ces études et retours d'expérience porte sur l'enseignement primaire et secondaire (K-12) ou professionnel, et peu traitent de l'enseignement des sciences pour l'ingénieur au niveau L3 et Master. De plus, ces études portent principalement sur l'utilisation de matériel portable de type tablette, et l'on trouve très peu de retours sur des pratiques plus immersives avec des lunettes holographiques. Il ressort qu'il est nécessaire de réfléchir à la manière de développer les cas d'utilisation de RA de façon à offrir une expérience d'apprentissage confortable pour les étudiants et à permettre aux enseignants d'ajouter ou de mettre à jour plus facilement le contenu. Les partenariats envisagés et explicités en partie III de cet article permettront de surmonter cette difficulté.

Ainsi, l'utilisation de système de RA dans les enseignements en sciences pour l'ingénieur pourrait améliorer l'autonomie et les apprentissages lors des activités pratiques. Cet apport permettrait de maintenir une formation associant savoir de haut niveau et maîtrise des savoir-faire propres à cette discipline. Les technologies de RA doivent donc être envisagées comme pouvant faciliter les apprentissages de concept nouveau et de haut niveau. Néanmoins, il convient de s'interroger sur ces pratiques pédagogiques nouvelles selon différents aspects et points de vue.

### • **Quels domaines et apprentissages doivent être privilégiés ? Quel support utiliser ?**

Bien que d'après les retours d'expérience la RA semble un outil prometteur pour les enseignements, il n'y a pas d'études dans le contexte de l'enseignement des sciences pour l'ingénieur en L3 ou Master. D'autre part, il est fort probable que dans l'ensemble des disciplines enseignées en sciences pour l'ingénieur, une partie ne puisse pas ou n'ait pas d'intérêt de par les concepts abordés ou le matériel employé, à utiliser de la technologie RA. Un développement d'activités d'enseignements utilisant la RA dans des domaines non privilégiés pourrait entraîner une mauvaise acceptation de cette technologie par les enseignants et les étudiants. La technologie de RA à utiliser est aussi à questionner vis-à-vis des supports et activités qui seront choisis. La part d'immersion ainsi que la possibilité de libérer l'usage des mains pendant le travail des étudiants sont des éléments à prendre en compte. Ces éléments dépendent fortement des supports utilisés et des situations didactiques envisagées.

### • **Quelle posture adopter pour l'enseignant ?**

G. Brousseau [12] définit la dévolution comme un « acte par lequel l'enseignant fait accepter à l'élève la responsabilité d'une situation d'apprentissage [...] et accepte lui-même les conséquences de ce transfert ». L'utilisation de la RA en enseignement entre pleinement dans cette problématique de dévolution. Dans le cas où l'on utilise des lunettes de RA, l'étudiant est seul à vivre son expérience immersive ; l'enseignant n'a pas

<sup>2</sup> <https://codereality.net/advanced-augmented-reality-online-course/> accès le 01/11/2022

<sup>3</sup> <https://foxar.fr/education> accès le 01/11/2022

<sup>4</sup> <https://spectraltms.com> accès le 01/11/2022

<sup>5</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=Q0vpxe8mLZY> accès le 01/11/2022

forcément la possibilité de connaître ce que voit l'étudiant et peut en être effrayé [13]. Cette technologie entraîne donc un changement de posture de l'enseignant, plus distant de l'étudiant, et moins acteur direct dans les apprentissages. Ceci interroge donc sur les méthodes et outils que l'enseignant doit développer, dans ce nouveau contexte de délégation des apprentissages, pour effectuer des actes de remédiation, de régulation, mais aussi sur la place laissée au travail en autonomie de l'étudiant.

- **Quel apport pour les étudiants ?**

L'objectif de l'utilisation de la RA dans les enseignements des sciences pour l'ingénieur est de pouvoir amener les élèves vers une maîtrise des savoir-faire de la discipline, associé à des concepts de haut niveau. L'utilisation de la RA en enseignement permet une meilleure autonomie des élèves et pourrait accélérer les processus d'apprentissages. Néanmoins, il est nécessaire d'évaluer et de quantifier concrètement l'apport de ces technologies dans l'enseignement supérieur. La littérature et les retours d'expérience de l'utilisation de la RA pour ce groupe d'étudiant sont inexistantes. Néanmoins, la littérature montre souvent que la motivation des étudiants est plus grande pour les enseignements lorsque la RA est utilisée. Cette technologie devrait alors permettre une meilleure adhésion des élèves aux parcours de formation proposés. D'autre part, même si l'usage du numérique permet une réduction du temps passé dans les apprentissages, il est souvent constaté que les connaissances acquises sont moins ancrées et moins maîtrisées. Il convient de vérifier que l'utilisation de ces nouvelles technologies permet bien aux étudiants d'acquérir correctement les compétences souhaitées. Enfin, la comparaison des apports réalisés vis-à-vis du profil des étudiants (origine, classement dans la promotion, etc.) est un élément important permettant de cibler le public à privilégier pour l'utilisation de ces technologies en enseignement. L'idée est ainsi de pouvoir accompagner les étudiants en difficulté ou n'ayant pas un bagage important dans les disciplines technologiques enseignées.

Ainsi, l'étude proposée porte sur le développement de l'usage de la RA dans les activités d'enseignement et l'étude de ces trois questions. Les travaux effectués se focaliseront sur le développement de contenus en RA utilisables dans les enseignements de Sciences pour l'Ingénieur. Ces travaux s'inscrivent de façon plus globale sur l'étude de l'impact des technologies de RA sur les pratiques d'enseignement en Sciences pour l'Ingénieur. Il s'agit alors d'étudier l'utilisation des technologies de RA dans les activités d'enseignement.

L'objectif à terme de cette évolution dans les pratiques pédagogiques est de permettre un gain dans les apprentissages en termes de temps d'acquisition des savoir-faire, de faciliter l'apprentissage de concepts de haut niveau. Mais il s'agit aussi de pouvoir accompagner les étudiants dans ces apprentissages afin d'homogénéiser leurs réussites malgré leurs difficultés ou leurs parcours antérieurs.

### 3. DEVELOPPEMENTS EFFECTUES

L'un des éléments importants pour la réalisation de cette étude concerne le développement de plusieurs activités et situations d'apprentissage en croisant les supports de RA utilisés et les outils de développement. La réalisation de ces activités nécessite de créer des modèles, de la documentation et des programmes informatiques. Tous ces développements sont chronophages et nécessitent de nombreuses compétences informatiques. Il s'agit là d'un des principaux éléments bloquant pour le déploiement de ces technologies numériques en enseignement. Maintenant que les enjeux ont été présentés dans la partie précédente, nous proposons dans cette partie de décrire des outils et les cas d'application réalisés.

#### 3.1. Cas d'application et supports utilisés

Pour cette étude deux cas d'application ont été choisis. Un premier sur les machines-outils à commande numérique (MOCN) 5 axes et un second sur des robots industriels sériels 6 axes. Pour chacun de ces cas d'application, deux types de formation sont envisagées, une formation orientée opérateur ayant pour objectif de rendre les étudiants capables d'opérer le système en autonomie (mise en route, déclenchement de programme) et une formation plus propre aux thématiques abordées dans la formation, à savoir rendre les étudiants capables de modéliser et de paramétrer le système.

Pour ces quatre formations, deux supports de RA sont utilisés. Il s'agit de tablette et de lunettes hololens 2. Le premier système est de cout réduit et d'usage bien maîtrisé par les étudiants, tandis que le second est plus immersif et permet de libérer les mains, mais est de manipulation moins aisée.

#### 3.2. Programmation des activités

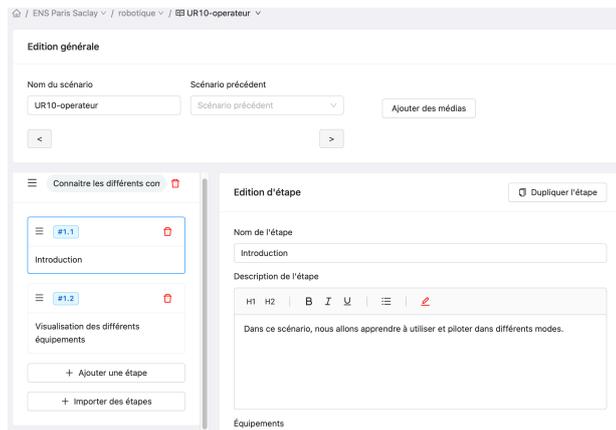
La programmation des scénarii de formation et des contenus dans un environnement immersif représente une difficulté, car elle nécessite l'emploi de logiciels spécifiques afin d'utiliser les différents composants des supports employés. L'accès aux données de positionnement et d'affichage n'est possible qu'au travers d'outil de développement<sup>6</sup> et la gestion de l'affichage des objets 3D utilise des logiciels issus du domaine du jeu vidéo. Certains de ces logiciels sont libres et d'autres associés à une licence payante. Il n'existe pas forcément de solution complète permettant de créer facilement du contenu de réalité augmentée à partir de contenus 3D, cela nécessite la maîtrise de diverses suites logicielles. L'ensemble des solutions logicielles étudiées ici ainsi que les supports associés sont résumés dans le Tableau 1 et sont présentés dans les paragraphes suivants.

<sup>6</sup> <https://developer.apple.com/augmented-reality/> accès le 23/11/2022

**Tableau 1 – Bilan des logiciels testés**

Solution Logicielle	Tablette	Lunette Hololens	Application développée
Spectral Studio	x	✓	MOCN 4X Opérateur – Robot
Foxar	✓	x	Opérateur MOCN 4X - MOCN 5X Robot
Unity, MRKT, Vuforia	✓	✓	MOCN5X - Robot

Le logiciel Spectral Studio de l'entreprise **Spectral TMS** gérant l'édition de contenu et la construction de scénario pour lunette HoloLens a été utilisé. À partir d'une arborescence composée d'étapes et de tâches (Figure 1), il est possible d'importer différents médias (document, modèle 3D rigide) qui seront utilisés lors de la construction du scénario. Une fois les différents éléments positionnés dans l'espace, l'étudiant peut jouer le scénario. L'action de l'étudiant est limitée à la validation des différentes étapes.



**Figure 1 – Interface de programmation Spectral Studio**

Pour des applications sur tablette, le logiciel utilisé est issu de la société **Foxar** qui fournit un kit de développement (programmation dans le langage Scratch<sup>7</sup>) permettant d'associer des contenus 3D (via le logiciel Blender<sup>8</sup>). Ce logiciel **Foxar** est développé sur le moteur de jeux vidéos **Unity**<sup>9</sup> et utilise les outils ARkit disponibles sur iPad ou Android.

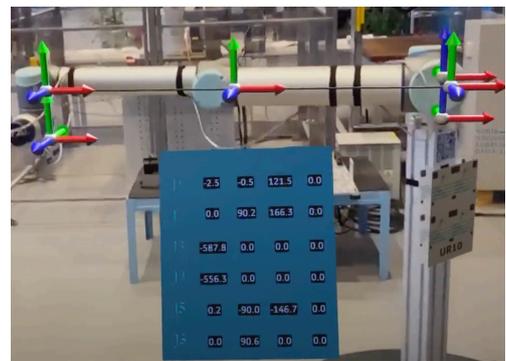
Pour les applications Hololens 2 et Android, le moteur de jeux vidéos **Unity** en combinaison avec les extensions **MRKT**<sup>10</sup> et **Vuforia**<sup>11</sup>. **Unity** permet d'importer des objets 3D issues de différentes sources, notamment CAO et de réaliser des scripts pour que les objets se comportent comme voulu. **MRKT** permet de rajouter de l'interaction entre les modèles est les informations captées par les Hololens (manipulation d'objets virtuels avec les mains ...). **Vuforia** permet de faire de la reconnaissance d'image et de pouvoir recalibrer les objets 3D dans le mode réel et de donc de réaliser la RA.

Dans nos cas d'application, les systèmes étudiés possèdent des degrés de liberté (axes de translation et de rotation sur les machines-outils et les robots). Ainsi, afin que les objets 3D soient positionnés en adéquation avec le système réel, une interface de communication a été développée pour récupérer les paramètres du système réel et actualiser le modèle 3D en temps réel (60Hz).

### 3.3. Exemple des réalisations

De façon à pouvoir comparer les différentes solutions logicielles tant d'un point de vue programmation, qu'expérience utilisateur, différentes activités ont été créées. Comme précédemment décrit ces applications concernent à la fois des problématiques de modélisation et de réglage des MOCN, mais aussi des robots industriels (Tableau 1). Nous ne présentons ici que les développements associés aux robots.

Afin de faciliter la mise en œuvre du robot (mise en route pilotage), la solution proposée par Spectral TMS a été utilisée avec des lunettes Hololens. Il s'agit de pouvoir réaliser en autonomie le démarrage d'un robot industriel et d'en expliciter le pilotage.



**Figure 2 - Exemple d'application RA**

Pour la mise en place d'un paramétrage de type Denavit Hartenberg modifié, une application sur tablette avec le logiciel foxar a été développée (Figure 2), il s'agit pour les étudiants de déterminer l'ensemble des paramètres nécessaires à l'aide de l'outil RA. L'interface de la tablette permettant de superposer les différents repères intermédiaires avec la vue du robot, il est alors possible de montrer l'impact direct d'un des paramètres sur le positionnement des repères et de faire le lien avec le système réel.

La troisième réalisation a pour but de faire comprendre aux étudiants de BUT les notions de repères dans la programmation des robots manipulateurs. Il est en effet possible de faire apprendre au robot des repères locaux : repère utilisateur, repères outil, etc. Cependant ces repères sont virtuels. Leur position et leur orientation par rapport au repère global sont indiquées sous forme de coordonnées cartésiennes et angle d'Euler. Il est difficile d'appréhender leur position réelle dans l'espace et encore plus difficile de savoir se déplacer par rapport à ces

<sup>7</sup> <https://scratch.mit.edu> accès le 23/11/2022

<sup>8</sup> <https://blender3d.fr> accès le 23/11/2022

<sup>9</sup> <https://unity.com/fr> accès le 23/11/2022

<sup>10</sup> <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrkt-unity> accès le 23/11/2022

<sup>11</sup> <https://www.ptc.com/fr/products/vuforia> accès le 23/11/2022

repères virtuels. L'application développée permet de visualiser ces repères dans le monde réel. La Figure 3 montre le résultat lors de l'utilisation par un étudiant.

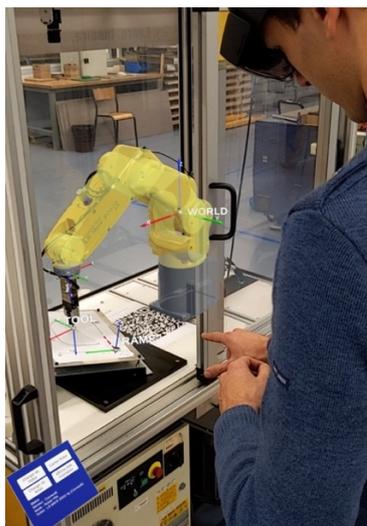


Figure 3 - Application de vision des repères

L'application précédente a aussi été portée sur smartphone Android de façon à pouvoir partager une image commune, identique à celle des lunettes, et pouvoir pointer les objets 3D sur l'écran. Cette dernière application a permis de prendre la photo de la Figure 4 qui sinon ne comprendrait pas les éléments de réalité augmentée. Cette application Android à l'avantage de pouvoir être installée à moindre coût sur la majorité des Smartphones, mais renforce le besoin de communication entre applications afin de coordonner les affichages. L'inconvénient d'une telle solution reste cependant qu'elle ne peut pas être utilisée seule, car elle monopolise une ou deux mains ce qui ne permet pas d'actionner le robot.

#### 4. BILAN ET RETOUR ELEVE

À partir de l'expérience acquise avec la programmation des différents scénarii et les essais réalisés avec des étudiants, nous proposons dans cette partie un bilan sur les différents outils matériel et logiciel.

##### 4.1. Bilan sur les outils de développement

Après avoir pu programmer différents scénarii sur les différents supports, il nous apparait intéressant de pouvoir comparer les différentes solutions selon trois critères (tableau 2).

Le premier concerne l'interactivité que l'utilisateur peut avoir avec les objets 3D. Cette interactivité est quasi inexistante avec Spectral studio où uniquement des modèles morts sont manipulés. Foxar permet une interactivité intéressante avec la possibilité de piloter des objets via des curseurs de commandes. Enfin l'utilisation de Unity offre tout le panel des interactions que l'on retrouve dans la plupart des jeux vidéos (gestion des collisions). Cette interactivité est malheureusement au détriment de la facilité de programmation. Si quelques

dizaines de minutes sont suffisantes pour réaliser un scénario avec des hololens en utilisant spectral studio, l'installation de Unity et des modules nécessaires à la compilation est déjà extrêmement chronophage et même si la communauté utilisant ce logiciel est importante le développement reste complexe.

Tableau 2 - Bilan des applications

Solution Logiciel	Spectral Studio	Foxar	Unity Mrkt
Interactivité avec les objets	x	✓	✓✓
Facilité de programmation	✓✓✓	✓✓	x
Complexité de la modélisation géométrique utilisable	x	✓✓	✓✓✓

Enfin, pour des formations autres que des formations opérateurs, il est pertinent de s'intéresser aussi à la complexité des modélisations géométriques utilisables. La gestion des objets 3D avec Spectral Studio étant limité à de l'affichage, elle est forcément très limitée pour des formations en enseignement supérieur. La solution utilisée par Foxar permet assez simplement de représenter toute chaîne cinématique ouverte, ce qui est suffisant pour la grande majorité des cas d'utilisation sur MOCN et Robot industriel. Encore une fois, bien que difficile à utiliser, le logiciel Unity via la possibilité de gestion des contacts et la programmation de fonction complexe en C# pour communiquer avec les systèmes réels offre de plus grandes possibilités.

##### 4.2. Retour d'expérience des étudiants

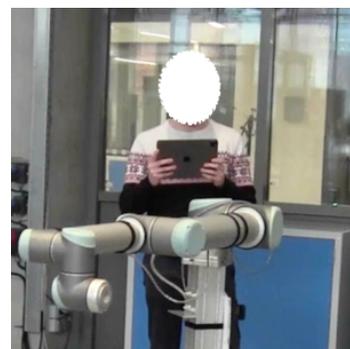
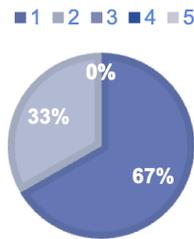


Figure 4 - Utilisation par les étudiants

De premiers tests ont été effectués afin de vérifier dans une première approche l'ergonomie des développements réalisés et de valider l'intérêt pour les étudiants. Les étudiants concernés sont des étudiants de première année de master ayant suivi un module de modélisation des systèmes poly-articulés. L'utilisation des outils RA (Figure 4) intervient donc après la réalisation du module, et du TP correspondant. Il ressort de ces premiers retours (Figure 5) que les étudiants accueillent très favorablement ces outils d'apprentissage. Même si les retours d'expérience portent sur un nombre restreint d'étudiants volontaire, ce qui peut biaiser l'étude, ces résultats sont encourageants pour la suite des travaux.

18c. vous pensez avoir mieux appréhendé le paramétrage DHm  
 Oui ○ ○ ○ ○ ○ Non



Utiliser une telle application en travaux pratique,  
 20a. pensez vous que cela puisse être  
 D'aucune aide ○ ○ ○ ○ ○ Une véritable aide

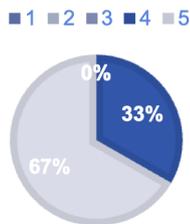


Figure 5 - Exemple de questions et retour des étudiants

Concernant l'application HoloLens 2 / Android permettant de voir les repères par-dessus les robots, une séquence pédagogique a été développée sur 2 axes :

- Savoir se déplacer relativement aux repères affichés (qui serait sinon que virtuel)
- Visualiser l'effet d'une erreur de mesure des repères sur leur position et leur orientation.

Cette séquence a été proposée à des volontaires de 2ème année de BUT GMP qui ont déjà une expérience dans la programmation des robots manipulateurs. Les deux applications, lunettes et Smartphone ont été proposées successivement. Leurs ressentis se sont avérés très positifs.

## 5. CONCLUSION

Les travaux proposés dans cet article portent sur l'étude des possibilités offertes par les outils de RA en enseignement des sciences de l'ingénieur. Dans une première approche, nous nous sommes principalement intéressés à réaliser une comparaison croisée entre les différentes solutions logiciels possibles et le matériel. Cette comparaison met en évidence une disparité importante dans la complexité des modèles utilisables (en adéquation avec les besoins en enseignement supérieur) ainsi que dans la facilité de programmation pour les enseignants. De premiers essais, avec des étudiants, issus des développements réalisés ont montré un retour très positif de la part de ces derniers. Ces retours d'expérience doivent être complétés sur de plus grandes cohortes afin d'apporter une meilleure analyse.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a en partie été financée par le projet « Oser » de l'Université Paris Saclay. Les auteurs remercient la société Foxar pour son accompagnement.

## RÉFÉRENCES

- [1] Milgram, Paul; H. Takemura; A. Utsumi; F. Kishino, Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum, Proceedings of Telem manipulator and Telepresence Technologies, 1995.
- [2] A.Y.C. Nee, S.K. Ong, G. Chryssolouris, D. Mourtzis, Augmented reality applications in design and manufacturing, CIRP Annals, Volume 61, Issue 2, pp. 657-679, 2012.
- [3] A. Klimova, A. Bilyatdinova, A. Karsakov, Existing Teaching Practices in Augmented Reality, 7th International Young Scientist Conference on Computational Science, Procedia Computer Science 136, pp 5-15, 2018.
- [4] K. Altmeyer, S. Kapp, M. Thees, S. Malone, J. Kuhn, R. Brünken. The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses—Theoretical background and empirical results, British Journal of Educational Technology Vol 51 No 3, pp611-628, 2020.
- [5] M. Akçayır, G. Akçayır, H. M. Pektaş, M. A. Ocak, Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories, Computers in Human Behavior, Volume 57, pp 334-342 2016.
- [6] W. Gavilanes, B. Cuji B, O. Toalombo, J.C. Fiallos J.C. Augmented Reality as an Academic Training Experience in Higher Education. In: Botto-Tobar M., Zambrano Vizuete M., Díaz Cadena A. (eds) Innovation and Research. CI3 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1277, 2021.
- [7] J. Martin-Gutierrez, M. D. M. Fernández, Applying Augmented Reality in Engineering Education to Improve Academic Performance & Student Motivation, International Journal of Engineering Education, Volume 30, pp. 625-635, 2014.
- [8] J. Da Costa, N. Szilas, A. Mueller, Réalité augmentée pour l'apprentissage conceptuel en sciences : quels principes de conception pour les EIAH ? Cas du dispositif DEAPE Learn en électromagnétisme Actes de la 9ème Conférence sur les Environnements informatiques pour l'Apprentissage Humain, Paris, 2019.
- [9] M. Dunleavy, C. Dede, R. Mitchell, Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Reality Simulations for Teaching and Learning J Sci Educ Techno, Volume 18, pp. 7-22, 2009.
- [10] Murat Akçayır, Gökçe Akçayır, Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature, Educational Research Review, Volume 20, pp. 1-11, 2017.
- [11] B. S. Hantono, L. Nugroho, P. I. Santosa, Meta-Review of Augmented Reality in Education, 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) 2018.
- [12] G. Brousseau, Théorie des situations didactiques, Grenoble, La pensée sauvage, 1998.
- [13] M Antonoli, C. Blake, K. Sparks, Augmented Reality Applications in Education JOTS, Volume 40, Number 2, 2014.

# Scénario pédagogique pour des opérations d'assemblage assistées par la Réalité Augmentée

M. Ghobrial <sup>a,\*</sup>, P. Seitier <sup>a</sup>, M. Galaup <sup>b</sup>, P. Lagarrigue <sup>b</sup>, P. Gilles <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 135 Av. de Ranguel, 31400 Toulouse, FRANCE

<sup>b</sup> Institut National Universitaire Champollion, Pl. de Verdun, 81000 Albi, FRANCE

\* e-mail : mina.ghobrial@insa-toulouse.fr

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Contexte

Aujourd'hui, la concurrence oblige les entreprises à produire des pièces de plus en plus rapidement tout en exigeant des intervalles de tolérances de plus en plus strictes. Les impératifs de délais et de coûts ne permettent pas de lancer une présérie et d'apporter des corrections en fonction des défauts constatés. Afin d'améliorer la qualité tout en réduisant le temps d'usinage, les machines sont devenues de plus en plus complexes, entraînant ainsi une augmentation des coûts d'achat et de fonctionnement. En conséquence, la période d'apprentissage plus longue de l'opérateur sur ces machines, combinée à des taux horaires plus élevés, rend désormais la formation des opérateurs particulièrement coûteuse.

En addition, les entreprises de ce secteur concurrentiel subissent des problèmes de recrutement dus à la baisse du nombre d'étudiants dans les filières scientifiques et technologiques. En France, les formations en génie mécanique souffrent d'un problème d'attractivité alors que le secteur offre de bonnes opportunités d'emploi.

Afin de répondre à une véritable demande sociétale, il a paru urgent de faire évoluer les formations vers de nouveaux supports pédagogiques innovants et performants, compatibles avec le haut niveau de connaissances techniques requis dans le domaine.

Cet article représente un retour d'expérience sur le développement d'une méthode pédagogique innovante et il est la suite du travail présenté lors du 17<sup>ème</sup> colloque national S.mart [1]; c'est également un travail préliminaire en début de thèse qui représente la prise en main de l'enchaînement scénario-expérimentation-analyse.

### 1.2. Terminologie

Selon Patel *et al.* [2], nous considérerons dans ce document que la Réalité Augmentée (RA), est un ajout d'objets virtuels sur le monde réel. La Réalité Virtuelle (RV) est une immersion complète dans un environnement artificiel créé à l'aide d'un ordinateur. Cet environnement est présenté et accepté par l'utilisateur comme un environnement réel. La RA et la RV sont souvent combinées pour atteindre des objectifs spécifiques. Dans le cadre de la thématique de recherche traitée, la solution déployée est une technique de Réalité Augmentée qui consiste à observer l'environnement d'assemblage via un écran ; ce dernier affiche le flux vidéo augmenté d'une webcam qui porte sur l'espace d'assemblage.

Selon Tricot *et al.* [3], concernant un environnement informatique pour l'apprentissage humain (EIAH), l'utilité concerne l'efficacité pédagogique, l'utilisabilité désigne la possibilité de l'utiliser et l'acceptabilité est une valeur associée conjointement à utilité et l'utilisabilité et concerne la décision d'utiliser cet EIAH". Selon eux, "toute relation observée entre ces trois dimensions est interprétable logiquement selon un degré de précision nécessaire et suffisant à toute évaluation d'un EIAH".

### 1.3. Etat de l'art

Un grand nombre de travaux sur l'utilisation de la réalité virtuelle et augmentée en formation ont été menés. Ces travaux montrent que ces nouveaux outils permettent de créer des zones de développement focalisées sur les étudiants. Nikhitha *et al.* [4] insistent sur l'augmentation de la motivation chez les étudiants et Gandolfi [5] souligne que ces outils peuvent fournir une opportunité

significative d'immersion et joueront un rôle clé dans les futurs cadres éducatifs. Miltenoff [6] rappelle cependant que "Après l'impact de la "nouveau", seuls les programmes de RV et de RA méthodologiquement bien construits et pédagogiquement bien appliqués continueront à retenir l'attention des clients".

Aujourd'hui les Environnements Numériques pour l'Apprentissage (ENA) nous amènent à reconsidérer les modèles d'analyse des situations d'enseignement-apprentissage. La description des phénomènes didactiques propres aux ENA a conduit à observer des phénomènes numériques pour la compréhension des processus d'apprentissages mis en œuvre par les apprenants [7].

Parmi les outils proposés dans la littérature, aucun à notre connaissance ne permet de former des étudiants sur des postes d'assemblage. Dans cette étude, nous allons donc développer une preuve de concept (PoC) d'un outil permettant d'assister les étudiants dans la prise en main d'un poste d'assemblage de porte-stylos. Cet outil est composé d'un ordinateur fixe, d'un outillage connecté et d'un scénario pédagogique.

L'outil en question est construit à partir de situations professionnelles afin de répondre à l'évaluation des profils de compétences attendus [8]. Dans cette phase de test (PoC), nous nous sommes focalisés sur l'étude des modalités d'usage [3] de ce dispositif pour apporter des éléments de réponse aux problématiques fondamentales d'utilisation de la réalité augmentée. Ainsi, nous cherchons à savoir comment l'utilisateur s'approprie cette nouvelle manière d'agir et de percevoir dans cet espace de travail et comment il peut accomplir des tâches et des activités professionnelles ciblées [9].

## 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### 2.1. Descriptif

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'utilisation de la réalité augmentée pour l'assemblage d'un produit et d'estimer les gains lors de la manipulation. Afin de quantifier la valeur ajoutée de l'outil, un questionnaire System Usability Scale (SUS) est utilisé, il est présenté §2- Le produit à assembler est un porte-stylo (Fig. 1-a). Le poste d'assemblage est muni d'un ordinateur fixe avec écran et d'une Webcam cadrée sur l'espace de travail (Fig. 1-b). Les outils utilisés lors de l'expérience sont un carrousel connecté facilitant la distribution des pièces, un étau de serrage et une clé de serrage (Fig. 1-c). Le carrousel est contrôlé par le logiciel de réalité augmentée ; à chaque étape du scénario qui nécessite une nouvelle pièce, le carrousel tourne et se positionne de sorte à dispenser à l'opérateur un bac rempli de la pièce concernée par l'étape du scénario. De manière concrète, ce carrousel est un plateau tournant sur lequel sont fixés les bacs contenant les pièces à assembler. Il est piloté par le logiciel AugmentedPro de chez Robocortex via un module Arduino. Des capteurs détectent sa position angulaire afin de permettre le pilotage.

Il est important de noter que le dispositif développé dans le cadre de l'action pédagogique est considéré comme une preuve de concept, il est donc important de noter que les résultats obtenus avec un nombre relativement petit d'élèves ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble de la population étudiante. Pour obtenir des résultats plus représentatifs, il faudrait tester le dispositif avec un échantillon plus large et diversifié d'élèves. Cela permettrait également de détecter d'éventuelles limitations ou problèmes que le dispositif pourrait rencontrer dans des contextes d'enseignement différents.

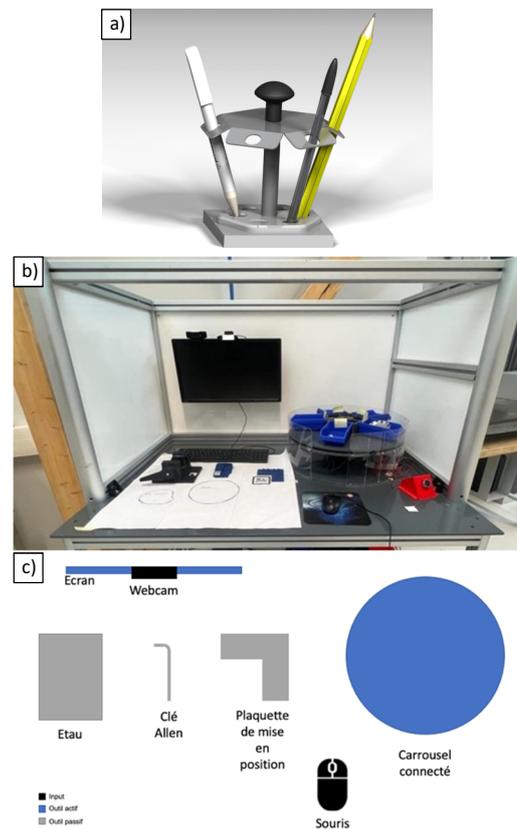


Figure 1 - a) Porte-stylo assemblé, b) Poste d'assemblage, c) Schéma du poste d'assemblage

L'audience ciblée est composée de 27 étudiants d'école d'ingénieur (INSA). La population peut être considérée comme homogène ; tous les étudiants en 4e et 5e année ont des connaissances en assemblage mécanique mais n'ont aucune expérience en assemblage assisté par la Réalité Augmentée. De plus ils n'ont jamais effectué des travaux pratiques portant sur l'assemblage à l'aide d'une gamme. L'ensemble de l'expérimentation a eu lieu sur un même site de travaux pratique.

Le scénario développé considère que les étudiants ont au plus 26 ans et qu'ils sont à l'aise avec les nouvelles technologies ; ils possèdent tous un smartphone. Le scénario proposé a pour but de les guider à assembler le porte-stylo, tout en utilisant l'outillage à disposition. Le test sera considéré comme réussi si l'étudiant arrive à assembler le porte-stylo sans aide extérieure. Le scénario mis en place est globalement linéaire et propose des actions d'assemblage successives. Par exemple, il est

proposé de serrer la vis à l'aide d'une clé après avoir placé la vis dans le trou central du socle (Fig. 2). L'étudiant passe à l'étape suivante en cliquant sur le bouton «suivant» en utilisant la souris. Afin de vérifier l'orientation correcte de la pièce «tôle», une étape d'inspection assistée par ordinateur est réalisée au cours de l'étape 2 de la phase 20.

PHASE 10	1 - Assembler l'axe avec le socle dans l'alésage,	
	2 - Placer la vis dans le trou central en faisant un premier tour,	
	3 - Visser en utilisant une clé Allen de taille 5,	
PHASE 20	1 - Placer le guide en tôle mince sur l'axe à travers le trou central,	
	2 - Ajuster la tôle de sorte à avoir les trous alignés avec les poches du socle,	
	3 - Visser le bouton sur le bout fileté de l'arbre à la main.	

Figure 2 - Gamme d'assemblage du porte-stylo [1]

Une augmentation suggère à l'utilisateur d'orienter la tôle réelle de sorte à la superposer avec l'objet augmenté. Le logiciel inspecte la position de la tôle en temps réel (Fig. 3). Lorsque la position angulaire de la pièce réelle par rapport à celle de son jumeau numérique est au-delà d'une valeur seuil prédéfinie, l'inspection refuse l'état de l'assemblage et l'augmentation devient rouge (Fig. 3-b). Si l'inspection valide l'état de la pièce l'augmentation devient verte (Fig. 3-c).

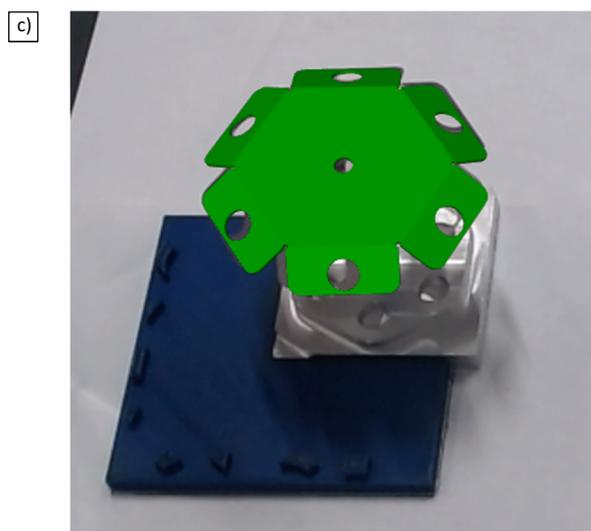
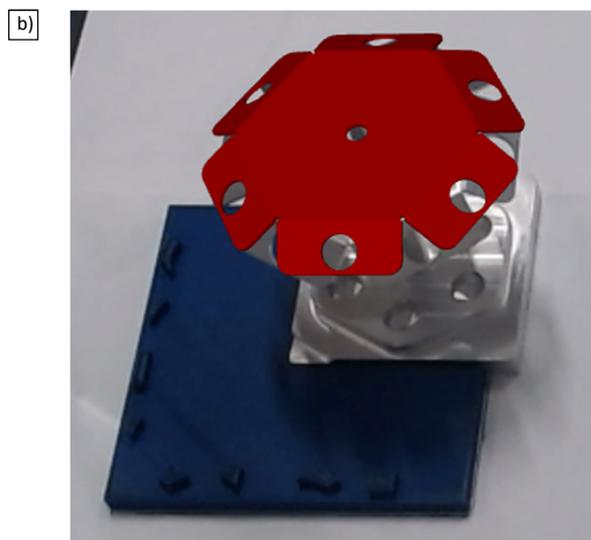


Figure 3 - a) Etape d'inspection, b) Etat refusé, c) Etat accepté

## 2.2. Evaluation

Le scénario ne pouvant fonctionner sans le poste d'assemblage, il a été décidé d'évaluer l'ensemble {poste d'assemblage + scénario} comme un outil dans son ensemble. L'outil est dans un premier temps évalué sur l'autonomie de l'étudiant. Comme précisé auparavant, le test sera réussi si l'étudiant parvient à assembler le porte-stylo de manière autonome. Les participants effectuent tout d'abord les manipulations d'assemblage du porte-stylo à l'aide du scénario (Fig. 1-b), puis répondent au questionnaire SUS adapté.

Le questionnaire SUS [10] créé par John Brooke en 1986 est utilisé pour évaluer l'utilité et l'utilisabilité de l'outil développé. Il faut noter que c'est la version française [11] qui a été utilisée pour lever toute ambiguïté de langage et que ce questionnaire SUS est normalisé. Cette enquête est censée - comme son nom l'indique - donner rapidement et facilement une idée de l'acceptabilité par les utilisateurs du produit réalisé. Il s'agit d'un questionnaire en 10 points avec cinq options de réponse pour les utilisateurs, de "tout à fait d'accord" à "pas du tout d'accord". Chaque question aura

alternativement des connotations positives et négatives, le but étant d'obtenir les scores les plus élevés pour les questions positives, et les plus bas pour les questions négatives. Le questionnaire a été modifié pour être bien adapté au contexte. Les 10 items du questionnaire utilisés sont :

1. J'ai trouvé l'étau facile d'utilisation
2. Je trouve que la disposition des éléments de montage n'est pas optimale
3. Je trouve que le carrousel est une valeur ajoutée intéressante
4. Je pense que certaines indications ne sont pas nécessaires
5. J'ai trouvé le concept de réalité augmentée intéressant
6. Je pense que l'orientation de l'image n'aide pas à la compréhension des indications.
7. Je pense que c'est une bonne méthode pour faire des TP
8. J'ai ressenti le besoin d'avoir un professeur pour m'aiguiller
9. J'ai trouvé le rapport bien agencé
10. J'ai trouvé le TP mal expliqué

Le score de chaque participant est calculé par la méthode SUS sur une échelle de 100 (Fig. 4).

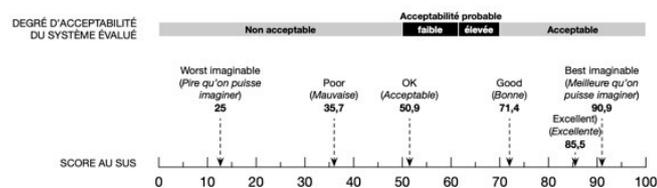


Figure 4 - Signification du score au SUS adaptée de Bangor et al [10] par Gronier [11]

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Résultat global des manipulations des élèves

Le résultat est positif puisque la totalité des élèves a réussi à assembler correctement le porte-stylo sans aide extérieure ce qui correspond à un taux de réussite de 100%. Ce résultat se justifie par le fait que le porte-stylo est un produit relativement simple à assembler. Un point particulier mérite d'être relevé, sans l'étape d'inspection de l'orientation de la tôle, la majorité des étudiants ne feraient pas attention à la pertinence d'ajuster la pièce « tôle » pour aligner les trous avec ceux du socle.

#### 3.2. Utilisabilité de l'outil

Le score global est de 76,85 sur 100 ; il a été déterminé à partir de la moyenne des notes des participants au questionnaire. On peut déterminer selon Bangor *et al.* (2009) que l'acceptabilité de l'outil est « bonne » (Fig. 4). Il est possible d'extraire une répartition des réponses qui a conduit à ce score global (Fig. 5).

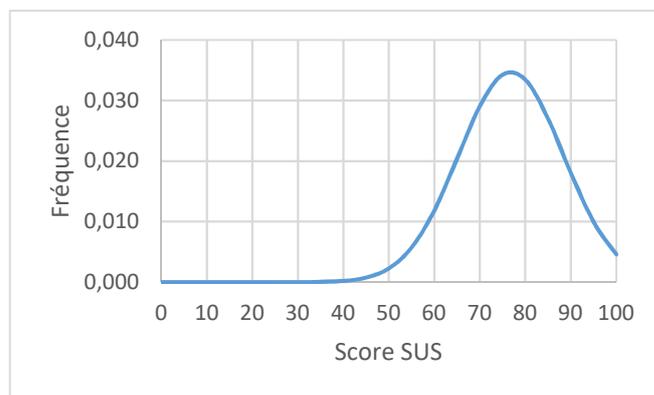


Figure 5 - Répartition des scores associés au questionnaire SUS

En considérant que les résultats obtenus sont assimilables à une loi normale, l'écart-type qui a conduit à cette dernière, présentée (Fig. 5) est de 11,49. Il est important de noter que la totalité des résultats du questionnaire sont supérieurs à 50,9 qui représente le seuil d'acceptabilité selon Bangor *et al.* (Fig. 4).

Deux points importants sont à considérer : A la question "J'ai trouvé le concept de réalité augmentée intéressant", 96,3% des personnes ont choisi "Tout à fait d'accord" ou "D'accord", et aucune n'a choisi "Pas du tout d'accord" ou "Pas d'accord". Cela montre l'intérêt des élèves dans cette technologie, cependant cet intérêt pourrait être lié à la découverte d'une nouvelle technologie.

#### 3.3. Problématiques émergentes

L'utilité et l'acceptabilité de l'outil présenté est prouvée par le résultat du questionnaire. A la suite de ce premier travail, plusieurs questions apparaissent concernant la transmission de compétences et plus généralement la dynamique de transmission :

- Qu'est-ce que les élèves ont appris, quelles sont les compétences transmises ? Faut-il un travail supplémentaire pour quantifier les compétences transmises ?
- Comment introduire une dimension jeu (gamifier) le scénario pour engager encore plus le joueur ?
- Est-ce que ce travail est extrapolable sur un autre assemblage plus complexe ? Une expérimentation va être menée sur une pompe mécanique.
- Est-il possible d'accompagner les étudiants avec un coût global inférieur ?

L'ensemble de ces questions montre qu'il est nécessaire de poursuivre l'étude pour cerner plus précisément les avantages et les limites de l'approche et plus généralement son utilisation potentielle avec d'autres équipements utilisés en enseignement de Génie Mécanique. La suite de l'étude concernera l'utilisation du poste d'assemblage didactisé pour effectuer un assemblage d'une pompe à injection, qui représente un assemblage plus complexe et plus pertinent vis-à-vis l'utilisation des nouvelles technologies déployées sur le poste d'assemblage.

## 4. CONCLUSION

Dans cette étude, une utilisation de la réalité augmentée et d'un outillage connecté accompagnant l'assemblage d'un produit mécanique a été présentée. L'outil qui a été développé est un poste d'assemblage assisté par une technique de réalité augmentée et d'un scénario d'utilisation. L'expérimentation présentée consiste à faire utiliser cet outil par une population de 27 élèves en différentes années de l'INSA de Toulouse répartis en plusieurs groupes de TP. Cette expérimentation a eu lieu lors d'une séance de TP au cours de laquelle les élèves ont directement pris en main le poste d'assemblage, suivi le scénario et répondu individuellement à un questionnaire SUS.

Les résultats montrent que l'outil est très bien accepté et qu'il est facile à prendre en main. Il faut noter que tous les élèves ont réussi à assembler le produit, ce qui valide le test individuel. La répartition des scores SUS autour de la valeur moyenne de 76,85 montre que les résultats du questionnaire SUS sont homogènes et normalement distribués avec un faible écart type. Ce constat confirme le résultat et valide aussi la méthode.

L'expérimentation a levé de nombreuses pistes d'amélioration dont certaines sont déjà en cours d'étude. Ces travaux concernent les possibilités d'utilisation d'un casque de réalité mixte ainsi que la transmission des compétences à l'aide de ce type d'outil. Pour compléter l'étude qui vient d'être présentée, l'utilisation d'un outil similaire pour l'assemblage d'un produit mécanique plus complexe sera expérimentée. L'objectif sera de cerner l'apport de la RA pour des assemblage complexe tant sur la position des composants du mécanisme que sur l'ordre des opérations d'assemblage.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les étudiants qui ont participé à la réalisation de cette étude dans le cadre de leur master : Marion MARC, Emma PERRODIN, Adeline VERDUMO, Charlotte VINSON. Leur implication est une des clés de la réussite de ce projet mis en place par les auteurs dans le cadre de leur thématique de recherche. Ils remercient également S.MART pour son soutien au travers du financement du stage de fin d'étude « Réalité Augmentée Industrielle » pendant lequel le poste d'assemblage a été conçu.

## REFERENCES

- [1] P. Seitier et P. Gilles, « Réalité augmentée en enseignement : l'outil ou la science ? », in *17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA*, LAVAL VIRTUAL WORLD, France, mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-03296135>
- [2] S. Patel, B. Panchotiya, A. Patel, et S. Ribadiya, « A Survey: Virtual, Augmented and Mixed Reality in Education », *International Journal of Engineering Research and*, vol. V9, juin 2020, doi: 10.17577/IJERTV9IS050652.
- [3] A. Tricot, F. Plégat-Soutjis, J.-F. Camps, A. Amiel, G. Lutz, et A. Morcillo, « Utilité, utilisabilité, acceptabilité : interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH », in *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain 2003*,

Strasbourg, France, avr. 2003, p. 391-402. [En ligne]. Disponible sur: <https://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00000154>

- [4] Dr. N. R. Dr. V. P. Joshith, « Augmented Reality in English Language Pedagogy: An Innovative Techno Culture for Contemporary Classrooms- A Meta Review », *IJAST*, vol. 29, n° 3, p. 5957-5968, mars 2020.
- [5] E. Gandolfi, « Virtual Reality and Augmented Reality », 2018, p. 545-561.
- [6] P. Miltenoff, « VR, AR and Video 360: A Case Study Towards New Realities in Education », *Augmented and Virtual Reality in Libraries (LITA Guides)*, vol. 12, 2018.
- [7] M. Galaup, « Phénomènes transpositifs et environnements numériques pour l'apprentissage », *Habilitation à diriger des recherches en Sciences de l'Éducation, Université Toulouse*, vol. 2, 2020.
- [8] G. Le Boterf, « Évaluer les compétences. Quels jugements ? Quels critères ? Quelles instances. », *Education Permanente*, p. 143-151, 1998.
- [9] M. Auvray et P. Fuchs, « Perception, immersion et interactions sensorimotrice en environnement virtuel », *intel*, vol. 45, n° 1, p. 23-35, 2007, doi: 10.3406/intel.2007.1265.
- [10] J. Brooke, « SUS: A quick and dirty usability scale », *Usability Eval. Ind.*, vol. 189, nov. 1995.
- [11] G. Gronier et A. Baudet, « Psychometric Evaluation of the F-SUS: Creation and Validation of the French Version of the System Usability Scale », *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 37, p. 1571-1582, 2021.



# Utilisation de la Réalité augmentée pour l'enseignement de gestes de kinésithérapie

G. Thomann <sup>a,\*</sup>, L. Hireche <sup>a</sup>, F. Noël <sup>a</sup>, S.-C. Medina-Galvis <sup>a</sup>, N. Pinsault <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Univ. Grenoble Alpes, , Institute of Engineering Univ. Grenoble, G-SCOP, 38000 Grenoble, France  
Alpes

<sup>b</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, TIMC-IMAG, département kinésithérapie, CHU Grenoble

\* e-mail : guillaume.thomann@grenoble-inp.fr

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Contexte de l'étude

Avec l'avancée des technologies notamment autour de la Réalité Augmentée (RA), plusieurs domaines peuvent bénéficier d'une réelle valeur ajoutée. Les dispositifs RA sont exploités dans différentes situations (tourisme, industrie, commerce, etc.) y compris dans des usages pour la santé. L'application ATLAS est une application mobile qui s'adresse aux professionnels de santé. Cette application permet aux utilisateurs de visualiser des modèles anatomiques dans un environnement réel. Il est ainsi possible par exemple de faire pivoter, zoomer ou disséquer un squelette humain (Figure 1).

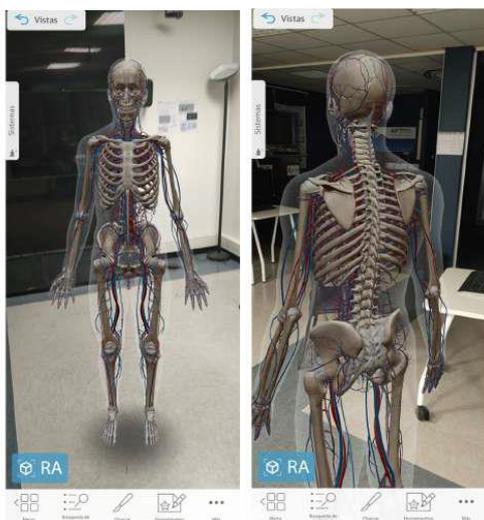


Figure 1 - Exemple de modèle anatomique 3D en environnement réel en utilisant la RA.

Au cours des dernières décennies, la RA a suscité un intérêt accru pour la création d'environnements éducatifs uniques dans différents domaines. Selon [1], « la RA fournit un apprentissage contextuel riche aux étudiants en médecine pour les aider à acquérir des compétences de base, telles que la prise de décision, le travail d'équipe efficace et l'adaptation créative des ressources mondiales pour répondre aux priorités locales ». Cette technologie peut ainsi être une plus-value dans le domaine éducatif.

Au cours de certaines séances de travaux pratiques appliqués, les étudiants en kinésithérapie doivent développer une capacité à localiser et à reconnaître les éléments anatomiques sous-jacents, à partir de palpations de surface ou à l'aide d'outils cliniques. Dans ces cours, ils doivent apprendre de nouvelles procédures spécifiques mais aussi faire appel à leurs connaissances acquises précédemment grâce à des ressources spécifiques : planches anatomiques (livres, dessins, schémas), vidéos de dissection, etc.

Cependant, les étudiants rencontrent des difficultés pour mobiliser ces ressources au cours de la procédure, en raison de leur disponibilité limitée et de leur pertinence au cours de la séance pratique.

### 1.2. Objectifs de l'étude

Ainsi, ce projet de recherche vise à aider les étudiants en kinésithérapie à apprendre de nouvelles procédures cliniques, dans notre cas l'auscultation pulmonaire. Ils pourront manipuler un dispositif d'aide à l'apprentissage développé avec la technologie de RA. L'objectif est de compléter l'environnement réel de l'élève au cours de son apprentissage, par la possibilité d'ajouter des ressources supplémentaires à l'environnement. L'objectif technique de cette recherche est de permettre une visualisation des points d'auscultation des poumons sur une représentation 3D des poumons sur le dos du patient,

pour une utilisation correcte du stéthoscope par les étudiants. Équipé d'un casque de réalité mixte, l'étudiant aura la possibilité de compléter son environnement réel par la projection de points d'auscultation pulmonaire superposés à une représentation 3D des poumons. De plus, ce dispositif vise à assurer la possibilité pour l'utilisateur d'avoir accès aux ressources externes qu'il juge utiles au bon déroulement de la session.

Concernant l'utilisabilité du dispositif dans ce contexte, cet enjeu implique la garantie que notre outil d'apprentissage sera utilisable et accepté en situation réelle. Selon la norme ISO 9241-11 (<https://www.iso.org/fr/standard/63500.html>)

« L'utilisabilité est le degré auquel un produit peut être utilisé par des utilisateurs identifiés pour atteindre des objectifs définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié ».

Les objectifs scientifiques à plus long terme sont d'étendre les connaissances scientifiques du domaine de la RA à des fins éducatives dans d'autres contextes d'enseignement appliqués. En effet, cette technologie étant encore assez nouvelle, les progrès sont également pour le moment limités. Par conséquent, disposer d'autres expériences, par exemple dans le cadre de la kinésithérapie, peut être bénéfique dans l'apport global en RA, notamment lorsque la démarche est réalisée en étroite collaboration avec les spécialistes du domaine.

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire G-SCOP, le laboratoire interdisciplinaire TIMC et le service de formation en kinésithérapie du CHU de Grenoble (IFPS).

L'état de l'art permet d'identifier les caractéristiques principales de la RA, les dispositifs existants dans l'éducation et dans le domaine de la kinésithérapie. L'utilisabilité et l'acceptation du produit constituent également un défi de taille à relever.

Une fois cela précisé, la question de recherche est posée pour faire ressortir ce que cette recherche tend à valoriser du fait de l'écart constaté précédemment avec l'état de l'art. Les outils mobilisés et la méthodologie de la recherche sont développés. Enfin, les résultats d'intégration à l'activité pédagogique, de développement de scénario d'utilisation et de prototype technologique sont présentés. Des discussions et conclusion finalisent notre proposition.

## 2. ETAT DE L'ART

Cet état de l'art doit permettre de mieux comprendre le concept de la RA, comment elle est utilisée en pédagogie et si des applications existent déjà dans le domaine de la santé. Les questions d'utilisabilité et d'acceptation sont également abordées.

### 2.1. Le concept de RA

La RA est une technologie ou un concept défini par la collaboration entre le monde réel et des objets virtuels (par exemple, son, texte, vidéo et objet 3D). C'est une vue

directe ou indirecte d'un environnement physique réel qui est enrichi par la superposition d'informations générées par ordinateur [2][3]. Cette technologie est à la fois interactive et le plus souvent basée sur de la visualisation en 3D [4]. La RA est dans certains cas définie comme un artefact utilisé via un écran placé sur la tête de l'utilisateur (en anglais HMD ou « Head Mounted Display »). Ainsi, pour éviter la limitation à d'un domaine d'application, [5] définit la RA comme un système qui possède trois fonctionnalités : « (1) Combinaison des mondes réel et virtuel (2) Interactivité en temps réel (3) et visualisation en 3D ». Il est noté que la visualisation peut être remplacée par toute projection perceptive (audio, tactile, etc.).

La RA utilise principalement deux technologies, celle du rendu visuel par la projection 3D ou l'image, et celle de la capture de l'environnement réel : principalement basée sur la localisation d'artefacts physiques appelé « tracking » [6]. Le tracking nécessite des informations de type marqueurs spécifiques tels que des images, un code QR ou une reconnaissance graphique naturelle dans un environnement réel. D'autres capteurs de positionnement sont exploités en RA comme la localisation par GPS. [7] classe les applications de RA en termes de caractéristiques d'interaction en fonction de la nature des périphériques de l'appareil tels que clavier, écran tactile, capteur spécifique ou système de reconnaissance gestuelle ou sensible au mouvement.

L'enjeu global de la RA vise à simplifier la vie de l'utilisateur en apportant des informations virtuelles non seulement à son environnement immédiat, mais aussi à toute vision indirecte de l'environnement réel. Cela aide également à améliorer la perception et l'interaction de l'utilisateur avec le monde réel. La RA diffère de la technologie de réalité virtuelle (RV), qui plonge complètement les utilisateurs dans un monde synthétique sans connexion avec le monde réel.

Les technologies de RA augmentent la perception de la réalité en superposant des objets virtuels et des repères sur le monde réel en temps réel. Certaines applications permettent de travailler différemment avec la RA, selon les cas, parfois l'application nécessite de supprimer des objets réels de l'environnement en plus d'ajouter des objets virtuels. En effet, retirer des objets du monde réel correspond à recouvrir l'objet d'informations virtuelles qui correspondent à l'arrière-plan afin de donner à l'utilisateur l'impression que l'objet n'est pas là. Les objets virtuels ajoutés à l'environnement réel peuvent montrer à l'utilisateur des informations que l'utilisateur ne peut pas détecter directement avec ses sens. Les informations transmises par l'objet virtuel peuvent aider l'utilisateur à effectuer des tâches quotidiennes. Il peut aussi avoir simplement un but de divertissement [8]. Il existe de nombreuses autres classes d'applications de la RA, telles que le divertissement, la publicité, la maintenance et la réparation, l'annotation, la planification de trajectoire de robot ou même la visualisation médicale liée à notre contexte de kinésithérapie.

En RA, il existe également le concept de marqueurs. Les marqueurs constituent première étape de la RA mobile.

Les marqueurs sont des repères visuels détectés par l'appareil afin d'effectuer une action. Ils peuvent prendre la forme d'une image ou d'un symbole également appelée photo de déclenchement qu'une personne peut numériser à l'aide de son appareil mobile via une application de RA. Le scan mobile déclenchera le contenu supplémentaire (vidéo, animation, 3D ou autre) préparé à l'avance pour apparaître au-dessus du marqueur [9].

## 2.2. La RA dans l'éducation

Une recherche menée par [10], a mis en évidence les spécificités des articles sur la RA publiés dans les revues d'éducation indexées dans la base SSCI entre 2012 et 2017. Au total 83 articles dans 22 revues ont été inspectés par une analyse de contenu. Ils ont été analysés selon leurs années de publication, le nombre d'auteurs, les pays, les disciplines/domaines éducatifs, les types de RA, les variables et les caractéristiques méthodologiques. Comme déterminé dans cette recherche, le nombre d'études liées à la RA a augmenté en 2014 et 2017 et elles ont été principalement menées dans le domaine des sciences de l'éducation. Au cours de l'étude, les variables les plus examinées dans les articles étaient la réussite et l'attitude. Après avoir rassemblé la littérature, cette étude a révélé que la majorité des études sur la RA ont été réalisées par des scientifiques travaillant dans des universités à Taiwan. Dans cet article, il considère que la RA est l'une des technologies potentiellement prometteuses dans l'éducation. En effet, elle a été utilisée principalement pour l'aide à l'apprentissage d'objets inaccessibles ou dangereux, la concrétisation de concepts abstraits ou encore l'apprentissage d'objets ou d'événements invisibles.

L'état de l'art met en évidence certaines études dans divers domaines tels que la langue [11], les mathématiques, les sciences, la médecine [12] et la géographie. Pour avoir une idée de certains dispositifs mobilisant la RA, l'exemple d'une étude menée à Taiwan pour aider à l'apprentissage de l'anglais [11] est intéressante. Il s'agit d'un développement d'un système d'instruction d'apprentissage omniprésent avec des fonctionnalités AR pour améliorer les performances de l'apprentissage de l'anglais comme langue étrangère en se confrontant à des situations réelles.

## 2.3. La RA dans l'éducation en santé

Dans le domaine de la santé, [1] met en évidence une sélection de 25 articles d'étude liés à la RA dans l'enseignement des soins de santé. Il montre que la RA est appliquée dans un large éventail de sujets de l'éducation sanitaire tels que l'injection articulaire, le placement de vis pédiculaires thoraciques, la chirurgie laparoscopique, l'administration d'anesthésie locale par exemple.

En ce qui concerne le concept, l'éducation médicale est décrite par le glossaire des termes de l'éducation médicale de l'AMEE (Association pour l'éducation médicale en Europe) comme "le processus d'enseignement, d'apprentissage et de formation des étudiants avec une intégration continue des

connaissances, de l'expérience, des compétences, des qualités, responsabilités et les valeurs qui qualifient un individu pour pratiquer la médecine » [13].

Au cours des dernières décennies, il est clairement apparu plus d'utilisations de la RA dans l'enseignement des soins de santé, notamment par ce que les étudiants et les professionnels de la santé ont besoin de plus d'expériences situationnelles dans les soins cliniques, dans un objectif de mieux préserver la sécurité des patients. Par conséquent, le large intérêt pour l'étude de la RA a mis en évidence les croyances suivantes :

- La RA fournit un apprentissage contextuel riche pour les étudiants en médecine pour aider à atteindre les compétences de base, telles que la prise de décision, le travail d'équipe efficace et l'adaptation créative des ressources mondiales pour répondre aux priorités locales.
- La RA offre des possibilités d'apprentissage plus authentique et fait appel à plusieurs styles d'apprentissage, offrant aux étudiants une expérience d'apprentissage plus personnalisée et exploratoire.
- La sécurité des patients est préservée si des erreurs sont commises lors de la formation aux compétences avec la RA [1].

Les soins cliniques s'intéressent également à la RA car elle offre aux médecins une vue interne du patient, sans avoir besoin d'une procédure invasive. Pour donner un exemple il est intéressant d'avoir un aperçu des revues scientifiques concernant un nouvel outil basé sur la RA se concentrant sur l'anatomie du membre inférieur l'ARBOOK. Le concept de cette technologie est de combiner une partie standard de l'anatomie descriptive du membre inférieur comprenant l'ostéologie, l'arthrologie et d'autres applications cliniques, avec une carte pour chaque partie anatomique qui peut être reconnue par une webcam numérique connectée à un ordinateur. Puis une image en RA apparaît sur l'ordinateur du lieu de travail des étudiants [12].

Un autre enjeu de la RA dans le contexte de l'éducation à la santé est la représentation du patient. Dans certains cas, il s'agit d'un vrai patient, dans d'autres d'une maquette de la partie clinique ou d'un modèle. La société américaine GigXR [9] a lancé le concept d'« HoloPatient ». Le but ici est de simuler des scénarios réels explorés en temps réel. Ils utilisent des technologies immersives pour réinventer la formation et l'apprentissage dirigés par un instructeur. Le projet en collaboration avec l'Université de médecine du Michigan travaille sur une aide à l'apprentissage à distance pour un HoloPatient qui a des problèmes respiratoires (GIGXR).

[1] montre que les apprenants peuvent accepter la RA comme une technologie d'apprentissage, et que la RA peut améliorer l'effet d'apprentissage par l'acquisition de compétences et de connaissances, la compréhension des relations spatiales et des concepts médicaux, l'amélioration de la rétention d'apprentissage et de la performance sur les tâches cognitivo-psychomotrices. La RA répond également aux problématiques de fourniture d'appareils d'une manière pratique et opportune qui

raccourcit le parcours d'apprentissage et simule des expériences authentiques.

#### 2.4. Utilisabilité et acceptabilité de l'outil

Selon la norme ISO 9241, « L'utilisabilité est le degré auquel un produit peut être utilisé par des utilisateurs identifiés pour atteindre des objectifs définis avec efficacité, efficacité et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié ».

L'utilisabilité est la capacité d'un objet à être facilement utilisé par une personne donnée pour effectuer la tâche pour laquelle il a été conçu. La notion d'utilisabilité englobe à la fois la performance de réalisation de la tâche, la satisfaction que procure l'utilisation de l'objet et la facilité avec laquelle on apprend à s'en servir. C'est une caractéristique de l'interaction entre un artefact et son utilisateur. L'objectif d'utilisabilité est établi en fonction de l'efficacité, de l'efficacité et de la satisfaction de l'utilisateur. Ces deux notions définissent l'usage d'un outil et l'acceptabilité d'un système. L'interface homme-machine doit être adaptée à son utilisation. Un produit aura donc du succès à condition qu'il soit utilisable. L'analyse de l'utilisabilité doit contribuer également à une expérience utilisateur optimale [14].

Quant à l'acceptation, elle peut être décrite comme la volonté démontrable au sein d'un groupe d'utilisateurs d'utiliser la technologie de l'information pour les tâches qu'elle est censée supporter [15].

#### 2.5. Conclusion de l'état de l'art

L'état de l'art montre une lacune concernant les recherches d'usage de la RA en kinésithérapie. On note également un manque de projets de recherche concernant les protocoles cliniques.

La RA dans un contexte d'apprentissage vise à augmenter l'effet d'apprentissage par l'acquisition de compétences et de connaissances, la compréhension des relations spatiales et des concepts médicaux.

Afin de contribuer à l'état de l'art, la présente question de recherche est ici posée : "Comment un dispositif de réalité augmentée peut-il être mis en place dans un processus d'apprentissage en kinésithérapie ?" Deux sous-questions en découlent :

- La RA facilite-t-elle le processus d'apprentissage des étudiants en école de kinésithérapie ?
- Existe-t-il des méthodes ou des outils de conception pour favoriser l'utilisabilité et l'acceptabilité d'un outil d'apprentissage utilisant la RA ?

### 3. MATERIAUX ET METHODE

#### 3.1. Contexte pratique d'enseignement

Pour cette étude, une observation des pratiques dans un centre de formation en kinésithérapie a été conduite. L'aménagement actuel de l'espace de travail des séances pratiques est le suivant : dix tables d'examen médical placées parallèlement par rapport au tableau blanc et deux autres tables au centre, perpendiculaire au tableau

blanc. Les tables d'examen centrales sont réservées au professeur pour montrer l'exercice pratique du jour sur un élève. En ce qui concerne l'exercice, il peut être effectué sur la table d'examen ou debout, en mouvement ou statique, avec ou sans besoin d'un outil clinique, tous ces paramètres dépendent de la localisation de l'exercice palpatoire et de quel type d'observation les étudiants doivent faire pour établir leur pronostic. La figure suivante (Figure 2) montre la disposition d'une session pratique comprenant 21 étudiants (il y a un trinôme) assis derrière leur table d'examen médical et l'enseignant devant le tableau blanc et leur table.

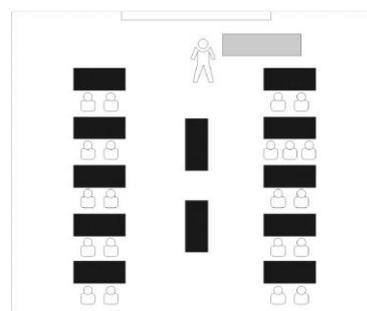


Figure 2 - configuration de la salle de cours actuelle

La session pratique a lieu juste après les cours théoriques, afin d'approfondir les connaissances cliniques. Bien que certains professeurs trouvent utile d'appuyer leurs cours pratiques par des diapositives théoriques, ils visent à montrer leurs exercices pratiques pour s'assurer qu'ils comprennent tous les enjeux d'une bonne mobilisation ou du suivi d'un protocole clinique. Dans certaines séances où l'on s'apprête à apprendre un nouveau protocole clinique, il peut être question d'utiliser un outil clinique comme un stéthoscope.

Concernant le déroulement de la séance, deux phases distinctes sont observées : des phases animées par le professeur (temps consacrés à la présentation de l'exercice, présentation de la situation pratique, séance de questions/réponses entre enseignant/élèves) et les phases pratiques (participation de l'étudiant à l'exercice pratique suite aux explications du professeur).

Dans la présente étude, une fois ces phases pédagogiques terminées, les élèves pratiquent les exercices de palpation en binôme, ils posent donc leurs affaires (cahier, ordinateur) sur le côté des tables. Il n'y a pas d'espace approprié pour ranger leurs affaires. Un autre point observé lors de cette observation est le manque de temps pour certains élèves de noter toutes les instructions du professeur pendant le temps imparti. Les conséquences apparaissent dans la phase pratique pendant laquelle ils n'ont plus assez de temps pour s'entraîner.

#### 3.2. Equipement technologique

Un casque de RA, l'Hololens2 de Microsoft est utilisé. Tout le développement réalisé dans l'environnement Unity 3D. La technologie Hololens exige de travailler avec un sujet réel fixe (qui n'est ni en mouvement et ni ne se déforme). Effectivement, cette technologie basée sur du

SLAM (pour Simultaneous Localization And Mapping). Il s'agit de la procédure par laquelle un ordinateur analyse un environnement et élabore une carte numérique de cette zone. Elle ne permet pas de faire de la capture de mouvement et suppose l'environnement fixe.

### 3.3. Méthode

La méthode de recherche, est une procédure spécifique de collecte et d'analyse des données essentielles au projet. En conséquence, la méthodologie utilisée au cours de ce projet est présentée en Figure 3.



Figure 3 – méthodologie de développement du projet

La première phase est consacrée à l'observation et à la revue de la littérature dans un contexte médical pour la spécialité kinésithérapie et dans un contexte technologique avec l'aspect RA. Il permet d'acquérir des connaissances pédagogiques dans un contexte médical spécifique : des séances pratiques de kinésithérapie sont observées, le schéma/organisation pédagogique de ces séances sont connus et la collecte de données est effectuée. Cette phase permet d'avoir une meilleure compréhension du contexte pratique dans lequel un environnement de RA pourra être proposé.

La deuxième phase vise à acquérir des compétences techniques en développement d'environnement de RA et à initier des exemples d'applications mobilisant ce dispositif. Dans cette seconde phase les données collectées sont exploitées.

La troisième phase est itérative et relativement plus longue : le développement d'un prototype du dispositif de RA pour l'inspection pulmonaire et son évaluation. Plusieurs scénarios sont créés en collaboration avec les enseignants et professionnels de santé. Cette étude permet d'utiliser une méthode agile spécifiquement dédiée à la validation du prototype avec les différentes boucles composées des phases de conception, de prototypage et d'évaluation. Une dernière itération permet d'aboutir à un prototype final satisfaisant l'ensemble des exigences exprimées par les clients et utilisateurs.

Un retour d'expérience fournit une première idée de l'acceptation du produit au sein des sessions pratiques.

## 4. RESULTATS

L'intégration du dispositif proposé à l'organisation actuelle de la séance pratique est présentée dans le tableau 1. Aucune modification n'est prévue concernant les phases théoriques : le dispositif ne sera pas présent dans l'environnement étudiant. Le dispositif de RA est prévu pour être intégré dans la séance pratique pour l'étudiant. Équipé du casque Hololens2, l'étudiant a la possibilité de visualiser le poumon et les points d'auscultation lors de la démarche adaptée à cette

information. La dernière phase est l'exercice, où il est idéal de définir un exercice avec l'Hololens2.

Tableau 1 – activités proposées en fonction des phases de cours

Phase théorique	Historique du protocole
	Description du bruit respiratoire
	Pathologies pulmonaires
Phase pratique	Aucune manipulation de l'appareil
	Manipulation du stéthoscope
	Apprentissage des points d'auscultation pulmonaire
Exercice	Visualisation des poumons et des points d'auscultation
	Lier les bruits respiratoires aux pathologies
	Reconnaître les caractéristiques des sons respiratoires
	Accès aux bandes sonores en fonction du point d'auscultation
	Mise en place des questions sous l'appareil

Dans le scénario proposé, des fenêtres apparaissent pour configurer le programme :

- Pour configurer le choix de la main de l'utilisateur.
- Pour configurer le sexe du patient : dans la séquence de palpation antérieure, le protocole change en raison de la présence de la poitrine.

Une fois ces paramètres entrés, une étape très importante à prendre en compte lors du développement en RA est l'étalonnage. En pointant avec son doigt des points précis, représentés ci-dessous sur la figure 4, et en donnant la commande vocale « Prendre position », un point d'étalonnage apparaît. Un ordre spécifique est proposé pour positionner ces points, en haut à droite pour commencer, et continuer avec chaque indication donnée. Si l'utilisateur souhaite supprimer le dernier point pris, il doit donner la commande vocale "supprimer le point". Une fois l'étape d'étalonnage terminée, les poumons et les points d'auscultations apparaîtront en superposition au dos du patient. La figure 5 montre les instructions données à l'utilisateur pour qu'il puisse placer les points d'étalonnage pour permettre la mise en place de l'image des poumons avec les points d'auscultation (Figure 6).

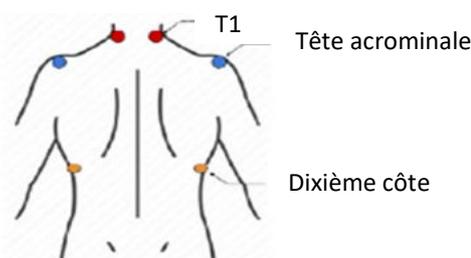


Figure 4. Points d'étalonnage



Figure 5. Instruction et placement des points d'étalonnage

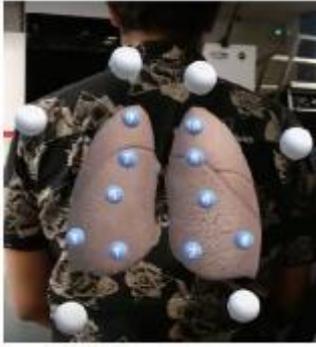


Figure 6. Image des poumons avec les points d'auscultation

## 5. DISCUSSION

Le développement de l'outil a été limité aux options nécessaires pour une première version servant de démonstrateur expérimental. La fonction la plus délicate consiste en l'étalonnage de la RA sur le dos du patient qui doit rester immobile. Une fois cette étape franchie et validée par l'ensemble des acteurs, l'ajout d'options comme l'implantation de ressources externes dans l'environnement est technologiquement plus simple.

L'expérience requiert des préexercices pour acclimater les utilisateurs à la technologie et pour calibrer le casque à l'œil de l'utilisateur. Au total, ils durent 10 minutes mais ont un impact certain dans la formation. C'est un point important à clarifier avec les kinésithérapeutes si on veut intégrer l'outil dans une séance pratique avec des étudiants et cela dépendra de la régularité de l'usage de systèmes de RA.

L'ordre de placement des points d'étalonnage demeure difficile à comprendre. En effet, la photo de référence présentée à l'utilisateur (figure 5) est peu précise et pourrait gagner à être interactive. Cette étape a dû régulièrement être refaite par l'utilisateur. Il reste important de donner des instructions claires et concrètes à l'utilisateur pour avoir une expérience optimale avec l'outil. De plus, le point d'étalonnage n'apparaissait pas exactement à l'endroit pointé avec l'index de l'utilisateur. La précision de l'Hololens est en question pour réaliser une RA pertinente.

## 6. CONCLUSION

Pour conclure, l'état de l'art en RA montre des lacunes dans notre contexte spécifique appliqué à la kinésithérapie. On note également un manque de projets de recherche concernant les protocoles cliniques associés. De plus, dans les revues précédemment citées, le sujet de l'enquête est soit un modèle, soit une projection de ce modèle au travers de systèmes comme l'Hololens. Avec la technologie Hololens utilisée ici, une des limites est de travailler avec un sujet réel qui peut être en mouvement. Effectivement, cette technologie ne permet pas de capture de mouvement ou de déformation d'un corps.

Les premiers tests en condition écologique permettent néanmoins de juger la RA utilisable pour des applications

de formation en kinésithérapie mais il reste d'en démontrer l'utilité effective au travers d'un usage prolongé in situ.

## RÉFÉRENCES

- [1] Zhu E, Hadadgar A, Masiello I, Zary N. AR in healthcare education: an integrative review. *Peer J*. 2014
- [2] Klopfer, E. & Squire, K. (2008). Environmental detectives—the development of an AR platform for environmental simulations. *Educational Technology Research and Development*, 56(2), 203–228. 2008  
doi:0.1007/s11423-007-9037-6
- [3] Yuen, S., Yaoyuneyong, G. & Johnson, E.. AR: an overview and five directions for AR in education. *Journal of Educational Technology Development and Exchange*, 4(1), 119–140. 2011  
doi:10.18785/jetde.0401.10
- [4] Carmigniani J, Furht B. AR: An Overview. In: Furht B. (eds) *Handbook of AR*. Springer, New York, NY. 2011  
doi:10.1007/978-1-4614-0064-6\_1
- [5] Azuma, R. T. A survey of AR. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385, 1997
- [6] Cheng, K. H. & Tsai, C. C. Affordances of AR in science learning: suggestions for future research. *Journal of Science Education and Technology*, 22, 449–462. 2013  
doi:10.1007/s10956-012-9405-9
- [7] Gao, L. Natural gesture-based interaction for handheld AR (Unpublished master thesis). Department of Computer Science University of Canterbury, Christchurch. 2013
- [8] Wikitude. Wikitude world browser official website. Retrieved from <http://www.wikitude.com/tour/wikitude-world-browser>. 2016
- [9] Zvejniaks G., "Marker-based vs markerless augmented reality: pros & cons. [Online]. Available: <https://overlyapp.com/blog/marker-based-vs-markerless-augmented-reality-pros-cons-examples/>. [Accessed December. 16, 2022], 2019
- [10] Fidan, M. and Tuncel, M. AR in education researchers (2012–2017): A content analysis. *Cypriot Journal of Educational Sciences* 13(4):577-589. 2018  
doi:10.18844/cjes.v13i4.3487. 2018
- [11] Ho, S. C., Hsieh, S. W., Sun, P. C. & Chen, C. M. To activate English learning: listen and speak in real life context with an AR featured u-learning system. *Educational Technology & Society*, 20(2), 176–187. 2017
- [12] Ferrer-Torregrosa, J., Torralba, J., Jimenez, M. A., Garcia, S. & Barcia, J. M. ARBOOK: Development and assessment of a tool based on AR for anatomy. *Journal of Science Education and Technology*, 24, 119–124. doi:10.1007/s10956-014-9526-4. 2015
- [13] Wojtczak A., *Glossary of Medical Education Terms*. Institute for International Medical Education, White Plains, New York, USA. 2013
- [14] Usibilis, Définition utilisabilité ou usabilité, Conseil UX et Ergonomie Digitale. 2018
- [15] Dillon, A. User Acceptance of Information technology. In: W.Karwowski (ed). *Encyclopedia of Human Factors and Ergonomics*. London:Taylor and Francis. 2001

# Le patrimoine industriel en virtuel comme outil de formation

A. Wartelle <sup>a,b,\*</sup>, R. Querrec <sup>a</sup>, F. Laroche <sup>b</sup>, M.-M. Abiven <sup>a</sup>, S. Laubé <sup>c</sup>, M. Gasnier <sup>d</sup>, I. Astic <sup>e</sup>

<sup>a</sup> Lab-STICC, ENIB, France

<sup>b</sup> LS2N, Ecole Centrale de Nantes, France

<sup>c</sup> Centre François Viète, UBO, France

<sup>d</sup> FEMTO-ST, RECITS, UTBM, France

<sup>e</sup> Musée des Arts et Métiers, France

\* e-mail : wartelle@enib.fr

## 1. INTRODUCTION

L'apprentissage en immersion (*immersive learning*) est un outil pédagogique qui offre de nombreux avantages. Plongé dans un environnement en réalité virtuelle, l'apprenant est impliqué émotionnellement et moins sensible aux distractions extérieures, ce qui favorise l'attention. Les situations dans lesquelles il peut être placé, inspirées de la réalité, lui permettent également de contextualiser les connaissances théoriques qu'il a acquises. Pour ces raisons, l'apprentissage en immersion représente un complément intéressant des méthodes de formation classiques.

Le projet ANR Lab In Virtuo [1] a pour objectifs le développement et la validation d'« Environnements Virtuels Intelligents Réalistes Sensoriels » (EVIRS). Ces environnements sont envisagés comme des laboratoires virtuels interdisciplinaires, dans lesquels différents acteurs peuvent travailler de manière collaborative sur des sujets culturels et patrimoniaux. Par ailleurs, ce sont des outils de formation à part entière, au sein desquels nous pouvons faire exécuter des scénarios de médiation par des Agents Conversationnels Autonomes (ACA) afin de présenter des connaissances historiques et patrimoniales à des apprenants. Ces agents peuvent notamment restituer des savoirs incarnés (*embodied knowledge*) grâce à la capture de gestes. Dans le cadre du projet, nous nous intéressons principalement à des Paysages Industriels Culturels Sensoriels (PICS) [2].

Nous émettons l'hypothèse suivante : l'immersion dans un EVIRS permet une amélioration de l'explicitation, de la compréhension et de la mémorisation des connaissances.

## 2. POSITIONNEMENT

Lab In Virtuo s'inscrit dans une démarche de conservation des métiers et savoir-faire industriels. Un aspect essentiel du projet est son approche pluridisciplinaire : il réunit des profils issus des sciences humaines et sociales, et d'autres, plus techniques. L'informatique est ici mise au service des arts et des sciences humaines, et la collaboration entre acteurs de différents domaines est essentielle à la réussite du projet.

La réalité virtuelle semble avoir un effet positif sur l'acquisition de connaissances sur des objets historiques [3] [4]. Il nous semble important de pouvoir non seulement manipuler les représentations 3D des objets patrimoniaux, ce qui se fait déjà dans certaines expositions [5], mais aussi, dans le cas de machines industrielles, de les mettre en fonctionnement. Ce sont des outils : on ne peut pas se contenter de les décrire comme des objets statiques et omettre de représenter leur cinématique, leur usage.

En ce qui concerne les ACA, de nombreuses études se sont penchées sur la qualité perçue de leur discours ; elle passe notamment par une vraie adaptation aux actions de leur interlocuteur humain [6] (les ACA doivent savoir écouter). Des travaux récents [7] décrivent un système de conversation avec des robots sociaux ou des agents conversationnels basé sur le contenu sémantique des énoncés. Ce système vise à générer des conversations plus enrichissantes en restituant des connaissances sur les sujets évoqués, mais il ne permet pas de mettre à jour ces connaissances par l'interaction. Or, nous souhaitons que les ACA puissent servir d'interface à des utilisateurs

experts et leur permettent de modifier les connaissances existantes ou d'en répertorier de nouvelles.

La dimension sensorielle est également un axe peu exploré dans les humanités numériques. Si la vue apporte son lot d'informations sur les paysages étudiés, une description complète de ces paysages doit passer par les autres sens, notamment l'ouïe (archéologie des paysages sonores) [8].

### 3. MODELE INFORMATIQUE

Notre modèle vise à établir un lien bidirectionnel entre un corpus numérique, composé de données et de sources historiques, ainsi que des dispositifs techniques pour les conserver et y accéder, et un EVIRS, le Lab In Virtuo (voir Figure 1). Les utilisateurs, experts ou apprenants, doivent pouvoir interagir avec le corpus numérique : le consulter, le simuler, le modifier, selon leur rôle et leurs besoins. Dans ce corpus, nous souhaitons pouvoir représenter des systèmes complexes et des activités ; des informations qualitatives sur les données historiques ; et enfin des données sensorielles, principalement visuelles et sonores dans un premier temps.

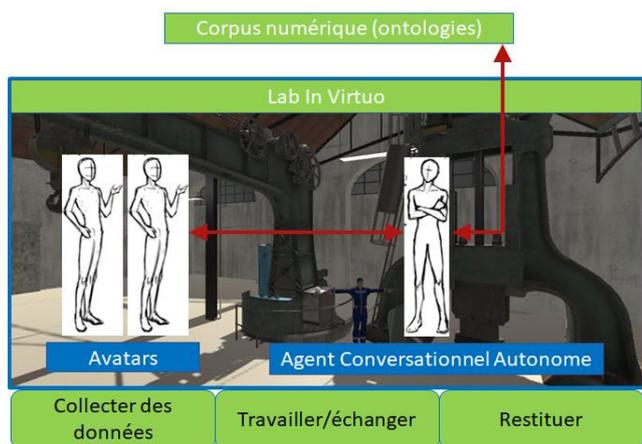


Figure 1 : Architecture du projet Lab In Virtuo

Ce sont des ACA qui jouent le rôle d'interface entre les utilisateurs, incarnés dans l'environnement par des avatars, et les connaissances contenues dans le corpus. Ces agents restituent des données textuelles grâce à la synthèse vocale. Nous souhaitons aussi qu'en utilisant une grammaire spécifique, les apprenants puissent poser des questions précises sur les données contenues dans le corpus, et que les ACA soient capables de leur répondre.

Pour constituer le corpus numérique, nous nous appuyons sur l'ontologie générique ANY-ARTEFACT [2], qui permet de décrire des systèmes et des activités (Figure 2). Trois concepts la définissent : les artefacts, les acteurs et les savoirs.

- Un artefact est une production humaine qui a une fonction précise et qui possède la « capacité » de réaliser cette fonction. En outre, l'artefact est associé à un usage qui correspond à l'activité pour laquelle il a été créé. Dans le cadre de notre étude, nous considérons un système technique ou une

unité de production industrielle comme un artefact, car celui-ci a une fonction et un usage.

- La notion d'acteur peut être divisée en trois catégories : l'homme ou être humain, le groupe social composé au minimum de deux personnes ayant des buts ou intérêts communs, et la position ou le poste occupé. Nous considérons ces trois types, être humain, groupe et position, comme des acteurs qui participent à une activité donnée.
- Les savoirs englobent l'ensemble des connaissances relatives à une activité. Nous pouvons mettre en évidence plusieurs types de savoir : 1) les savoir-faire incorporés, qui sont indissociables de personnes ou de groupes concrets. Ils sont le résultat d'un apprentissage personnel, d'une expérience, ou d'une habileté. 2) les savoirs empiriques, scientifiques et scolaires, qui sont les types de savoirs qui ont été étudiés, et enfin 3) les savoirs techniques, qui correspondent aux connaissances et savoirs humains, conscients ou inconscients, qui permettent la mise en œuvre d'une technique. Cette notion de savoir que l'on attribue aux acteurs porte sur le savoir manuel, c'est-à-dire les gestes techniques, l'utilisation des outils, mais également les procédures et les métiers à proprement parler. Ces savoirs peuvent se transmettre sous plusieurs formes : de manière verbale d'un acteur à un autre, ou de manière matérielle à travers les plans ou les archives. Ils ne sont pas figés, mais se transmettent et évoluent en fonction des acteurs et du perfectionnement des objets techniques.

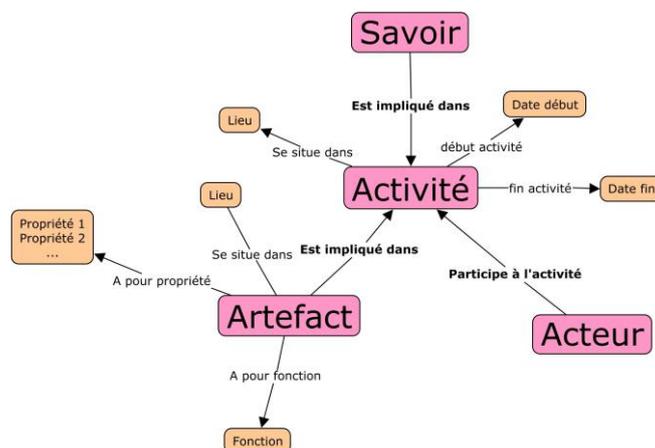


Figure 2 : Carte conceptuelle de l'ontologie ANY-ARTEFACT

L'ontologie ANY-ARTEFACT est en partie basée sur le modèle conceptuel CIDOC-CRM, conçu pour la représentation de collections muséales. Afin de modéliser les paysages industriels dans toute leur dimension sensorielle (bruit, chaleur, odeurs...), nous devons augmenter notre ontologie générique pour qu'elle puisse représenter ces concepts.

Chaque cas d'usage s'appuie sur une ontologie de domaine, qui dérive de l'ontologie générique et décrit un type de système (par exemple, une ontologie sur les ponts ou sur les forges).

## 4. CAS D'USAGE

### 4.1. Cas d'usage des différents partenaires

La généricité du modèle nous permet de l'appliquer à différents cas d'usage. Le projet ANR Lab In Virtuo réunit une grande diversité de partenaires avec des besoins spécifiques. Ils sont toutefois réunis par deux axes essentiels : la sensorialité et l'authenticité patrimoniale [2]. Nous travaillons sur les cas suivants :

- Le parc d'activité Techn'hom à Belfort, avec notamment l'ancienne filature Dollfus, Mieg et Cie (DMC) (voir Figure 3) ;
- La machine-outil NUMASURF, une fraiseuse à commande numérique anciennement utilisée dans l'industrie automobile ;
- Cap 44, les anciens grands moulins de Nantes ;
- Et à Brest, l'ancien pont tournant et le marteau-pilon des forges de Pontaniou.

Pour chaque cas d'usage, nous nous appuyons sur une ontologie de domaine, qui dérive d'ANY-ARTEFACT. Nous définissons par exemple une ontologie des ponts, grâce à laquelle nous pouvons décrire le pont tournant de Brest, mais qui pourra être utilisée pour modéliser d'autres ponts. Chaque paysage industriel donne également lieu à la création d'un ou plusieurs environnements virtuels, basés sur des sources de natures diverses : scans 3D, reconstitutions à partir de plans ou de sources textuelles, etc.

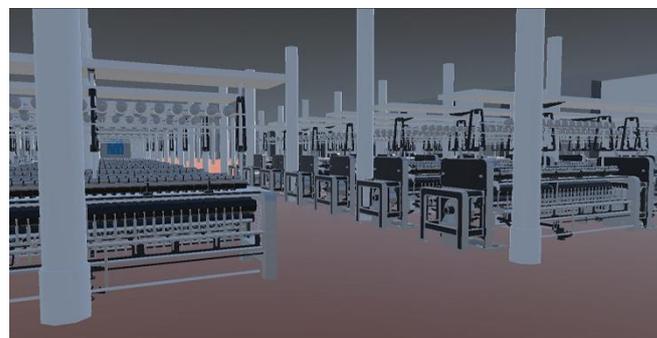


Figure 3 : Une reconstitution de l'ancienne filature DMC

### 4.2. Un cas d'usage précis : le marteau-pilon des forges de Pontaniou [10]

Les forges de Pontaniou, à Brest, abritent un marteau-pilon construit en 1867. En 2005, l'appareil est mis hors service, et en 2013, les ateliers des forges ferment définitivement.

En 2014, une capture LIDAR du marteau-pilon et du bâtiment qui l'abrite a été effectuée. À partir de cette capture et de photos du lieu, l'entreprise Virtualys a produit une modélisation 3D, qui sert de base à notre environnement virtuel (Figure 4).

Le corpus numérique est stocké grâce au logiciel *open source* Omeka S, qui permet de gérer et valoriser des collections d'items à l'aide d'une interface web. Nous avons choisi Omeka S car c'est un outil de référence, déjà largement utilisé dans le domaine des sciences humaines. Il permet en outre de créer et maintenir des ontologies, grâce auxquelles nous pouvons organiser nos sources et connaissances historiques selon leur sémantique. Enfin, les données qu'il gère sont accessibles grâce à une API REST, on peut donc aisément les recueillir dans des applications tierces, et notamment dans le moteur Unity, qui fait tourner notre environnement virtuel.

Nous interagissons avec ce corpus numérique de trois façons différentes (voir Figure 1) :

- La plus évidente, et la plus simple à mettre en place, c'est la restitution de connaissances dans l'EVIRS. Elles sont présentées sous la forme de scénarios pédagogiques au cours desquels un ACA extrait des informations du corpus numérique pour les présenter à un ou des utilisateurs humains, les apprenants, représentés par des avatars.
- Un autre type d'interaction possible est la collecte de données depuis l'EVIRS : un utilisateur expert (typiquement, un historien), immergé dans l'environnement, apporte des connaissances au corpus.
- Enfin, le travail en collaboration est un troisième type d'interaction, hybride des deux précédentes. Nous pourrions comparer des corpus constitués sur un même sujet par des experts de disciplines ou spécialités différentes (par exemple, un historien et une archéologue). Dans cette même logique de collaboration, le Lab In Virtuo peut servir de support pour présenter des idées de reconstitution aux citoyens et les faire valider.

Pour introduire les connaissances décrites par l'ontologie dans l'environnement virtuel, nous utilisons le métamodèle UML MASCARET [9], qui permet d'instancier des systèmes et d'exécuter des activités en environnement virtuel. Il est possible d'établir un alignement entre les concepts majeurs d'ANY-ARTEFACT (Artefact, Acteur, Activité) et ceux de MASCARET (Entité, Rôle, Activité, Agent) [10]. Ainsi, MASCARET est l'intermédiaire idéal entre le corpus numérique et l'environnement virtuel.

Afin de transférer les connaissances de manière naturelle aux utilisateurs finaux, nous choisissons de faire exécuter aux ACA des scénarios de médiation qui les contextualisent. Ces scénarios sont rédigés par des médiateurs.



Figure 4 : L'environnement virtuel basé sur les forges de Pontaniou

Dans cet environnement, l'apprenant immergé peut assister à des scénarios pédagogiques joués par des ACA, qui représentent les ouvriers des forges et une guide. Un extrait de scénario, modélisé sous forme de diagramme d'activité UML, est représenté sur la Figure 5; il se concentre sur une activité métier, le forgeage d'une grosse pièce métallique.

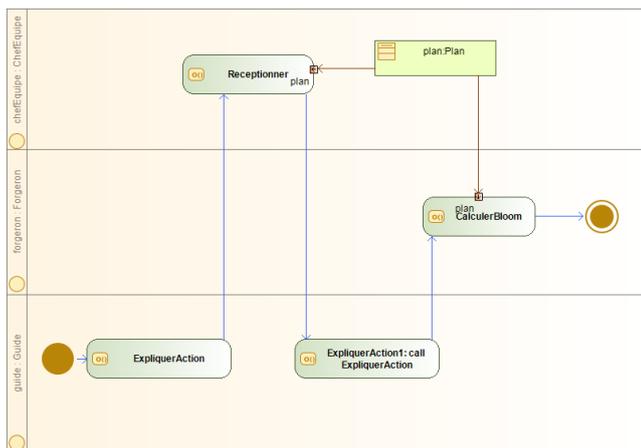


Figure 5 : Scénario « fabrication d'une pièce métallique » aux forges

Dans ce scénario, l'ACA guide explique les actions effectuées par les ACA ouvriers. Ses informations sont tirées de l'ontologie du domaine des forges, stockée dans Omeka S. La guide est également capable d'afficher des médias tirés de l'ontologie. À terme, nous souhaitons établir une liste exhaustive et sans redondance d'actions génériques pour les guides (par exemple, montrer du doigt un point de l'espace, ou changer le point de vue de l'apprenant). Ces actions doivent suffire à décrire n'importe quel scénario de médiation. Nous devons réfléchir à la définition exacte de cette liste, en échangeant avec des spécialistes de la médiation qui pourront la valider ou l'infirmer. Il nous faudra ensuite implémenter ces actions.

## 5. CONCLUSION

Pour le moment, nous avons établi un lien unidirectionnel entre un corpus numérique et un

environnement virtuel. Il est en effet possible de consulter une ontologie depuis l'environnement virtuel en assistant à des scénarios de médiation simples décrits manuellement. À plus long terme, on souhaite pouvoir créer, modifier et consulter un corpus directement depuis l'environnement virtuel. Ces actions s'effectueront soit à l'initiative de l'utilisateur, assisté par un ACA qui servira d'interface avec le corpus (l'agent jouera alors un rôle comparable à celui d'un interpréteur SPARQL), soit à l'initiative de l'ACA, qui pourra détecter dans son environnement des éléments peu ou mal documentés, et compléter l'ontologie en posant des questions à un expert humain. Bien que le projet ne porte pas directement sur le traitement du langage naturel, il serait intéressant de comparer notre solution avec ce que générerait un modèle de langage comme ChatGPT, notamment en termes d'authenticité et de spontanéité du discours.

Une fois cette étape franchie, nous passerons à la validation de notre hypothèse de départ grâce à des expérimentations. Pour rappel, notre hypothèse est la suivante : « l'immersion dans un EVIRS permet une amélioration de l'explicitation des connaissances, de la compréhension et de la mémorisation. » Deux expérimentations sont prévues afin de la tester : la première, dans un contexte contrôlé de laboratoire, visera à valider l'EVIRS en tant qu'interface avec le corpus numérique. Elle permettra de déterminer si l'utilisation du Lab In Virtuo permet bien une meilleure élicitation des connaissances par rapport aux méthodes classiques utilisées pour recueillir des données sur un objet patrimonial, qui sera sélectionné parmi les cas d'usage du projet. Nous recruterons une quarantaine de participants parmi des étudiants de master en Histoire des Sciences et Techniques, des étudiants en mécanique et en informatique, et des enseignants-chercheurs qui auront reçu une formation préalable. Ces participants seront répartis de manière homogène en deux groupes. L'un devra concevoir une ontologie à l'aide de méthodes standard (interview d'un expert, puis construction de l'ontologie avec un outil comme Protege) ; l'autre groupe produira une ontologie en utilisant le Lab In Virtuo, constituée automatiquement par les interactions entre les participants et un expert. Nous comparerons les ontologies produites entre elles, ainsi qu'avec une ontologie de référence réalisée par un expert. Pour cela, nous établirons des mesures quantitatives qui caractériseront ces ontologies selon leur niveau de complétion et leur précision : mesures de distances, qualité et granularité des concepts, couverture...

La seconde expérimentation s'adressera à un public plus large. Nous présenterons à des visiteurs de musées volontaires un scénario pédagogique dans le Lab In Virtuo. Nous recueillerons des données qualitatives sur leur niveau de mémorisation et de compréhension du sujet et sur leur ressenti, afin de comparer cette méthode de médiation à d'autres, plus traditionnelles. Cette évaluation s'appuiera sur des questionnaires classiques utilisés en psychologie cognitive et en ergonomie, comme le System Usability Scale.

## RÉFÉRENCES

- [1] R. Querrec, S. Laubé, S. Garlatti, N. Richard, M.-M. Abiven, B. Rohou, Lab in Virtuo : un Environnement Virtuel Intelligent pour l'histoire et le patrimoine des paysages culturels industriels, in: Archéologie : Imagerie numérique et 3D, 2018. <https://hal-inrap.archives-ouvertes.fr/hal-02100319>.
- [2] I. Astic, M. Gasnier, J.-L.J. Kerouanton, F. Laroche, S. Laubé, M. Pardoën, R. Querrec, N. Richard, Paysages industriels culturels sensoriels (PICS) et Environnements Virtuels: Vers une nouvelle approche de l'histoire et de l'archéologie industrielle, 2020. <https://shs.hal.science/halshs-02613279/>. Report.
- [3] P.-P. Li, P.-L. Chang, A study of Virtual Reality experience value and learning efficiency of museum - using Shihsanhang museum as an example, in: 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), 2017: pp. 1158–1161. <https://doi.org/10.1109/ICASI.2017.7988391>.
- [4] J. Rae, L. Edwards, Virtual reality at the British Museum: What is the value of virtual reality environments for learning by children and young people, schools, and families, MW2016: Museums and the Web. 1 (2016). <https://mw2016.museumsandtheweb.com/paper/virtual-reality-at-the-british-museum-what-is-the-value-of-virtual-reality-environments-for-learning-by-children-and-young-people-schools-and-families>.
- [5] M. Dima, L. Hurcombe, M. Wright, Touching the Past: Haptic Augmented Reality for Museum Artefacts, in: 2014: pp. 3–14. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_1).
- [6] J. Gratch, A. Okhmatovskaia, F. Lamothe, S. Marsella, M. Morales, R.J. van der Werf, L.-P. Morency, Virtual Rapport, in: J. Gratch, M. Young, R. Aylett, D. Ballin, P. Olivier (Eds.), Intelligent Virtual Agents, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006: pp. 14–27. [https://doi.org/10.1007/11821830\\_2](https://doi.org/10.1007/11821830_2).
- [7] L. Grassi, C.T. Recchiuto, A. Sgorbissa, Knowledge-Grounded Dialogue Flow Management for Social Robots and Conversational Agents, Int J of Soc Robotics. 14 (2022) 1273–1293. <https://doi.org/10.1007/s12369-022-00868-z>.
- [8] M. Pardoën, L'archéologie du paysage sonore: de la théorie à la pratique, RiMe. Rivista Dell'Istituto Di Storia Dell'Europa Mediterranea (ISSN 2035-794X). (2017) 181–193. <https://doi.org/10.7410/1297>.
- [9] R. Querrec, P. Vallejo, C. Buche, MASCARET: creating virtual learning environments from system modelling, in: SPIE, Engineering Reality of Virtual Reality (ERVR'13), SPIE, United States, 2013: pp. 8649–04. <https://doi.org/10.1117/12.2008186>.
- [10] M.-M. Abiven, Humanités numériques et méthodes de conservation et de valorisation des patrimoines maritimes : l'exemple des arsenaux de Brest et Venise, Theses, Université de Bretagne occidentale - Brest, 2019. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03209664>.



# Serrage 4.0 : Réalité augmentée et outils connectés pour une fiabilisation du procédé d'assemblage

A. Fau <sup>a,\*</sup>, E. Delsol <sup>a</sup>, A. Daidié <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, CNRS, IMT Mines Albi, INSA, ISAE-SUPAERO, UPS, Toulouse, France.

\* e-mail : a\_fau@insa-toulouse.fr

## 1. INTRODUCTION

L'industrie 4.0, révolution industrielle numérique, est le lieu du développement de nouveaux moyens de communication pour interagir avec les objets, ainsi que de technologies immersives, dont la réalité augmentée (RA). Ces solutions permettent aux entreprises de diminuer les coûts de production et d'améliorer les conditions de travail des salariés. Elles s'intègrent dans la digitalisation des usines et la continuité de la chaîne numérique allant de la conception des pièces à la production, via l'utilisation des jumeaux numériques [1].

Selon la définition de Milgram [2], la réalité augmentée consiste à intégrer des éléments virtuels dans un environnement réel. La Réalité Virtuelle (RV), par opposition, immerge ses utilisateurs dans un environnement entièrement virtuel qui peut refléter ou non le monde réel. Dans l'industrie, le déploiement d'une nouvelle ligne d'assemblage peut faire intervenir ces deux technologies pour des applications différentes. Par exemple, la réalité virtuelle, utilisée dans une phase amont du déploiement, valide l'ergonomie des postes de travail alors que la réalité augmentée intervient directement pour équiper le poste d'assemblage. Réalité virtuelle et augmentée sont donc aujourd'hui complémentaires et présentes dans divers secteurs d'activité pour offrir un support et une assistance aux personnes dans l'industrie [3,4] ainsi que dans l'enseignement et la formation [5,6]. Dans un cadre académique lors de Travaux Pratiques, la réalité augmentée est souvent utilisée pour remplacer les énoncés imprimés ou en format informatique par des supports virtuels. A l'INSA de Toulouse, un projet d'enseignement a consisté à concevoir un poste d'assemblage assisté par la réalité augmentée [7]. Dans ce projet, les étudiants sont formés à la création et l'utilisation de gammes de montage numériques. En enseignement, la réalité augmentée peut être le sujet du cours mais également une nouvelle méthode

d'enseignement interactive. Lorsque le mécanisme étudié est complexe, elle permet d'avoir accès à des visualisations 3D des systèmes et offre la possibilité d'interagir avec l'ensemble des composants. Dans le milieu industriel, les principales applications de la réalité augmentée sont situées dans la phase d'assemblage (aide au montage) [8,9,10], lors du contrôle qualité ainsi que pour la maintenance des systèmes. Elle est notamment utilisée pour l'inspection de mécanismes complexes [11,12]. Eswaran et al. [13] proposent une revue bibliographique de son utilisation en maintenance et en assemblage avec une description des différentes technologies de réalité augmentée ainsi que les perspectives associées. Dans le domaine de l'aéronautique et du spatial, les assemblages complexes sont propices à être assistés par les nouvelles technologies [14, 15] notamment à cause de la présence de nombreux éléments de fixation.

La réalité augmentée peut ainsi s'inscrire dans une démarche globale d'optimisation et de fiabilisation du procédé d'assemblage. Souvent longue, fastidieuse et méticuleuse, cette opération conditionne l'intégrité de la structure assemblée. La conformité de l'assemblage est liée à la fois au comportement physique de la liaison boulonnée mais également à la réalisation du procédé de serrage. La gamme d'assemblage décrivant les étapes de montage est l'outil qui guide l'opérateur. Lorsque l'étape comporte plusieurs éléments à serrer, une séquence de serrage à laquelle l'opérateur doit se conformer est prédéfinie. Elle est créée lors de la conception du système mécanique pour assurer un serrage efficace. La réalité augmentée offre donc, à travers les gammes de montage virtuelles et l'inspection des systèmes assemblés, un support aux opérateurs qui permet de les assister durant cette phase de la production. Elle peut être associée à des outils connectés (Figure 1), dont la présence est de plus en plus marquée dans les usines. Ces outils sont alors pilotés par l'intermédiaire d'un logiciel dédié. Cependant,

ils peuvent également recevoir des instructions directement de la gamme d'assemblage virtuelle.

Cette association des outils connectés et de la réalité augmentée est appliquée, dans le cadre de cet article, à l'assemblage d'une pompe hydraulique avec plusieurs liaisons vissées à serrer à un couple déterminé. L'objectif est double avec (i) une maîtrise de l'effort de serrage présent dans l'assemblage à la fin du serrage ainsi (ii) qu'une fiabilisation du procédé de serrage en lui-même.

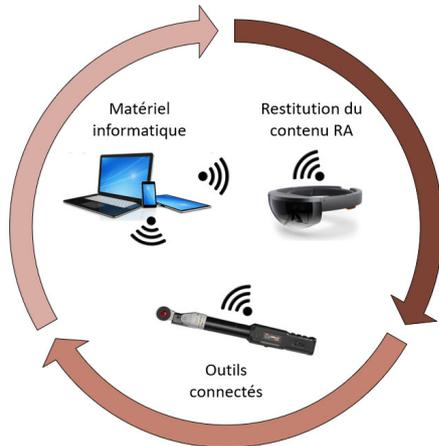


Figure 1 - Communication des outils connectés avec la technologie de réalité augmentée

## 2. ASSEMBLAGE CONNECTÉ

La révolution en cours dans le cadre de l'industrie 4.0 doit être l'occasion de développer et améliorer le processus d'assemblage. En effet, dans la majorité des systèmes mécaniques il représente une étape importante de l'industrialisation des produits ainsi que de la maintenance des systèmes. Dans l'optique de diminuer les coûts de production, le procédé d'assemblage doit donc être au cœur de l'innovation.

### 2.1. Problématique

Les opérations qui permettent d'aboutir à l'assemblage de plusieurs pièces mécaniques sont multiples, du perçage des pièces au serrage de la vis, et concentrent un grand nombre de travaux de recherche à la fois académiques et industriels. Le serrage de l'ensemble vis-écrou, dernière phase du processus d'assemblage, introduit un effort dans la liaison qui assure sa fonction d'assemblage à travers les critères de non-glissement et non-décollement aux interfaces des pièces assemblées. Plusieurs procédés sont disponibles, afin de réaliser le serrage (serrage au couple, serrage à l'angle, tendeur hydraulique, etc.). En fonction du moyen de serrage utilisé, il existe une incertitude sur l'effort de pré-tension réellement installée qui est dépendante du procédé de serrage employé. Le serrage au couple, par clé dynamométrique ou visseuse, est très répandu dans l'industrie de par sa facilité de mise en œuvre, malgré une incertitude importante concernant la pré-tension installée dans l'assemblage à la fin du serrage. En effet, la relation

entre le couple appliqué et la précontrainte fait intervenir les frottements aux interfaces de la liaison boulonnée [16]. Ces derniers sont difficilement quantifiables et constituent donc la principale source d'incertitude. L'association de ces incertitudes avec la précision du moyen de serrage provoque une variabilité de la pré-tension installée de 25 à 30% pour un couple donné [17]. Pour diminuer cette incertitude, l'angle de serrage peut être associé au couple. L'évolution du couple en fonction de l'angle permet alors d'analyser le comportement de l'assemblage pendant le serrage ainsi que d'identifier la pré-tension installée.

### 2.2. Maîtrise de l'effort de serrage

Un des enjeux industriels majeurs à l'heure actuelle dans l'assemblage mécanique concerne la maîtrise de l'effort de serrage introduit dans la liaison vissée/boulonnée. L'environnement confiné autour des fixations rend difficile la mesure de cet effort que ce soit dans la vis ou dans les pièces assemblées. Elle passe aujourd'hui par des méthodes d'instrumentation invasives [18,19] qui identifient l'allongement de la vis. Ces dernières modifient la configuration de l'assemblage et donc son comportement. Une méthode non-invasive consiste à exploiter les données liées au serrage, en l'occurrence le couple et l'angle de serrage [20]. Avec le développement des outils connectés, ces données deviennent accessibles en temps réel. Elles permettent donc d'identifier pendant le serrage, les différentes phases du procédé de serrage [21].

Au début du serrage (Figure 2), une faible augmentation du couple pour une rotation importante de l'élément tournant est observée. Elle est liée à la mise en contact des différents éléments de l'assemblage. Cette étape du serrage intègre la présence du couple de freinage dans le cas où des systèmes de freinage pour les écrous sont utilisés, afin d'éliminer les risques de dévissage spontané. Le couple d'accostage (Figure 2), défini comme la transition entre la mise en contact des pièces assemblées et le serrage réel, est identifié par un calcul de la dérivée. Lorsque la précontrainte est installée dans l'assemblage, l'évolution du couple en fonction de l'angle est affine. La pente de la courbe traduit notamment la raideur de la liaison, il s'agit donc d'un paramètre intrinsèque à chaque assemblage. Quand le changement de pente intervient ensuite, l'assemblage entre dans son domaine plastique. Pendant le serrage, le traitement en temps réel des données couple-angle ouvre la possibilité à une identification de l'effort de serrage. L'exploitation de ces données assure une maîtrise du couple réel appliqué, en identifiant le couple d'accostage-freinage par rapport au couple qui doit être appliqué au boulon. Le couple de consigne peut alors être corrigé en temps réel à partir du couple d'accostage identifié. Cette analyse qui précède la modification de la consigne de serrage n'est envisageable que lorsque les données sont disponibles. La détection de défauts (d'usure ou géométriques) présents dans l'assemblage est également possible à partir de l'allure de la courbe [21].

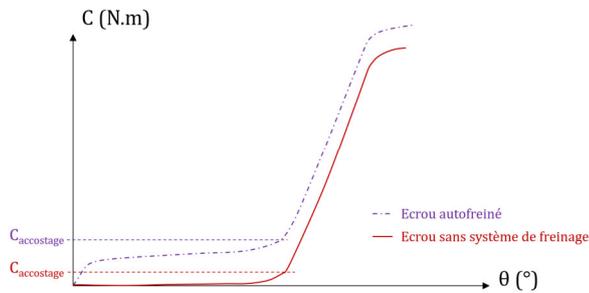


Figure 2 - Courbes couple-angle obtenues lors d'un serrage au couple avec mesure de l'angle

### 2.3. Assistance à l'opérateur

Souvent réalisé manuellement par clé dynamométrique ou visseuse, le serrage au couple est difficilement automatisable. L'opérateur est donc au cœur du procédé de serrage et est garant de l'intégrité de la liaison boulonnée et donc de la structure assemblée. Un contrôle et une traçabilité du serrage de chaque boulon sont mis en œuvre, afin de garantir le serrage effectué pour chaque vis. L'entrée dans l'industrie 4.0 avec la présence d'outils numériques et connectés facilite le suivi qualité. L'acquisition de nombreuses données en temps réel fournies par les outils connectés assure une traçabilité accrue des étapes de production. Pour l'assemblage de pièces, cela permet en cas de défaillance de la vis, d'identifier quel a été le couple appliqué.

La fiabilisation du procédé de serrage des assemblages boulonnés exploite également les jumeaux numériques et la digitalisation des entreprises. Pour cela, la solution immersive de réalité augmentée est très pertinente car elle permet de numériser le procédé de serrage. La gamme de montage numérique du système à assembler, réalisée par réalité augmentée, propose de visualiser à chaque étape de l'assemblage la position finale de la pièce à intégrer au système mécanique. Elle est généralement définie par le bureau des méthodes et ne peut être modifiée par les opérateurs sur les lignes d'assemblage. Les conditions choisies lors de la conception des systèmes mécaniques sont alors mises en œuvre. Pour les assemblages par liaisons vissées, cela permet de maîtriser le procédé de serrage. En effet, la manière dont le serrage va être effectué peut influencer le comportement mécanique de la liaison boulonnée. Les hypothèses choisies lors du dimensionnement pourraient ne plus être réunies, l'intégrité de l'assemblage étant alors compromise. Dans le cas des assemblages complexes comportant plusieurs centaines de vis, l'utilisation de la réalité augmentée, réduit les sources d'erreurs possibles lors du montage. Par exemple, lorsque l'opérateur est interrompu, la gamme de montage virtuelle lui permet d'identifier quelle est la dernière vis qui a été serrée et quelle doit être la suivante.

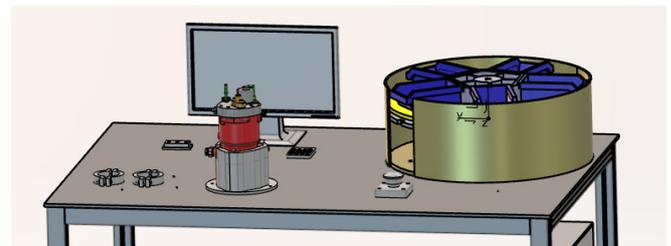
La méthode d'assemblage innovante proposée dans cet article allie la réalité augmentée et les outils connectés. Une connexion entre le logiciel de réalité augmentée et l'outil est alors indispensable. L'objectif est d'exploiter les nouveaux moyens de communication disponibles dans les outils connectés pour acquérir des données relatives au

serrage. L'exploitation de ces données en temps réel doit permettre une analyse fine du comportement de l'assemblage pendant le procédé de serrage.

## 3. CAS D'ETUDE

Le cas d'étude présenté ici s'intègre dans une vision globale de conception d'un environnement de travail qui reprend la démarche de l'industrie 4.0. Le poste d'assemblage innovant qui permet d'assurer le montage de systèmes mécaniques, en l'occurrence ici une pompe à injection Common Rail Delphi® (Figure 4a) utilisée dans l'automobile, est présenté par la Figure 3. Il s'agit du poste d'assemblage développé par Seitier et al. [7] dans le cadre de la création de Travaux Pratiques assistés par réalité augmentée dans l'enseignement. En plus de disposer d'une solution de réalité augmentée, il est doté d'outils connectés. En effet, un distributeur de pièces (à droite de la Figure 3a) est connecté au logiciel de réalité augmentée de la même manière que la clé dynamométrique utilisée lors du serrage des liaisons vissées (Figure 3b). Divers systèmes mécaniques peuvent être assemblés sur ce poste de travail grâce à sa flexibilité et sa configuration. Il se compose de plusieurs blocs fonctionnels (Figure 3) :

- Une caméra et un écran permettant d'assurer la fonction de réalité augmentée.
- Une zone de mise à disposition des outillages nécessaires au montage.
- Un espace dédié au montage (en face de l'écran restituant le contenu de réalité augmentée) incluant un porte-pièce qui assure un maintien de la pompe pour faciliter le travail de l'opérateur.
- Un distributeur de pièces connecté.



(a)



(b)

Figure 3 - (a) Jumeau numérique et (b) vue réelle du poste de travail 4.0 incluant le distributeur de pièces, la clé dynamométrique connectée et le système mécanique à assembler

### 3.1. Gamme d'assemblage virtuelle

Le poste d'assemblage permet l'exécution d'une gamme de montage industrielle par la réalité augmentée. Dans le cadre de ces travaux, la solution industrielle Diota® a été retenue. Le jumeau numérique de la pompe (Figure 4b) est utilisé pour projeter en 3D les pièces à assembler. Une caméra C920 Pro capte l'environnement de travail ainsi que le flux vidéo sur lequel le contenu virtuel est ajouté. L'ensemble est affiché sur un écran positionné en face de l'opérateur. Les instructions de montage sont communiquées par l'intermédiaire d'une procédure de réalité augmentée classique. La solution d'un écran a été privilégiée, dans un premier temps, car elle s'intègre dans l'ergonomie du poste de travail. L'opérateur dispose de ses deux mains pour réaliser les tâches de montage qui lui sont demandées et l'affichage sur un écran assure une visibilité des instructions importantes (par rapport à une tablette par exemple). L'utilisation de lunettes de réalité augmentée a été envisagée, mais cette solution n'a pas été retenue car elle n'apporte pas de bénéfice au regard de la configuration du poste de travail.

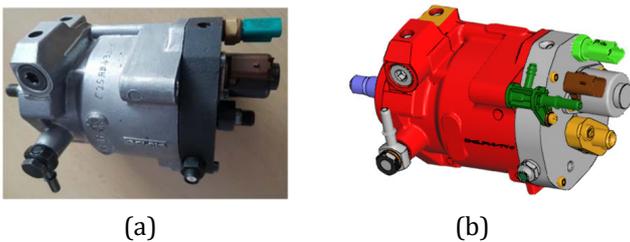


Figure 4 - (a) Pompe Common Rail Delphi® et (b) son jumeau numérique

La gamme de montage mise en place prend en charge l'installation de la tête hydraulique ainsi que l'ajout de composants annexes (Figure 5). Cette séquence de montage requiert donc l'assemblage de quatre composants (l'ensemble tête hydraulique-galets, le capteur de température du gazole, le régulateur IMV et la bride haute pression) sur le corps de la pompe par l'intermédiaire du serrage de sept vis.



Figure 5 - Affichage des composants à monter sur le carter de la pompe Common Rail Delphi®

Les pièces à assembler sont fournies à l'opérateur en fonction de l'étape de la gamme de montage. Pour cela, un distributeur de pièces connecté a été conçu. Programmé

sur Arduino, il est constitué de cinq emplacements. Dès que l'opérateur débute une étape de la gamme de montage, le distributeur de pièces se met en rotation et propose à l'opérateur la pièce nécessaire à l'étape de montage en question. Le distributeur et le logiciel de réalité augmentée sont connectés par un module ajouté dans Diota®. Le logiciel de réalité augmentée pilote donc la rotation du distributeur de pièces.

### 3.2. Serrage connecté

Pour réaliser le serrage au couple des liaisons vissées, une clé dynamométrique connectée est utilisée. Il s'agit de la clé DYNASAM® 4.0 du fabricant d'outillage français SAM Outillage. Compte tenu des valeurs de couple à appliquer, la clé avec une plage de serrage de 1 à 10 N.m est choisie. La clé dynamométrique communique par Wi-Fi pour recevoir les instructions et envoyer les données. Dans sa version commerciale, elle est vendue avec un smartphone et une application qui permettent de réaliser les serrages. Dans le cadre de ces travaux, la communication avec la clé dynamométrique est directement réalisée par l'intermédiaire du logiciel de réalité augmentée. De manière similaire au distributeur de pièces, le développement d'un module Diota® spécifique a été nécessaire. Ce module relie la solution de réalité augmentée Diota® avec la clé dynamométrique communicante. Il permet de commander la clé et de collecter en temps réel les données qu'elle envoie. Les instructions associées au serrage sont présentes dans le contenu de réalité augmentée (numérotation des vis et valeur du couple à appliquer). Un affichage du couple en temps réel a été ajouté dans l'interface graphique permettant à l'opérateur de réaliser un serrage efficace et précis (Figure 6).

Les vis à serrer sont affichées avec des instructions indiquant l'ordre dans lequel les serrages doivent être effectués. Un code couleur indique à l'opérateur quel est l'état de la vis : à serrer (rose), le serrage réalisé est conforme (vert) ou le serrage est non-conforme (rouge). Une plage de serrage est définie lors de la réalisation de la gamme, elle conditionne la conformité du serrage. L'opérateur n'a pas à renseigner la valeur du couple car elle est déjà définie dans la gamme de montage. Cette fonctionnalité permet de s'affranchir d'un réglage spécifique du couple sur la clé et d'envisager d'appliquer différents couples de serrage avec le même outil. Le couple final appliqué à chaque vis est répertorié et mémorisé ce qui assure une traçabilité du serrage. Une base de données contenant l'ensemble des serrages est alors disponible et exploitable. La connexion entre la clé dynamométrique connectée et les instructions d'assemblage virtuelles permet de :

- Mettre en évidence la vis à serrer,
- Programmer automatiquement la consigne de couple lors de l'exécution de la gamme d'assemblage,
- Contrôler la conformité du serrage,
- Assurer le suivi qualité de l'opération de serrage.

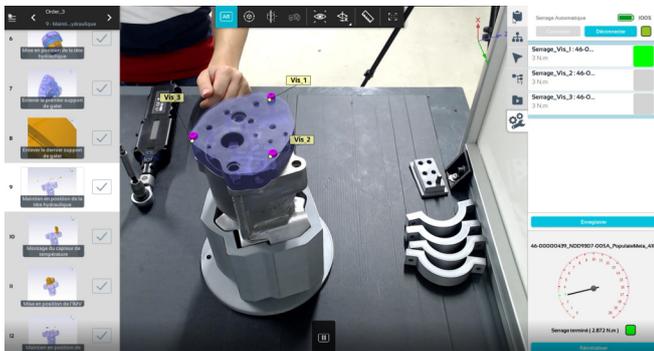


Figure 6 - Exemple de l'étape de montage de la tête hydraulique de la pompe Common Rail Delphi® avec restitution du contenu de réalité augmentée dans Diota®

#### 4. UTILISATION DE LA REALITE AUGMENTEE, PERTINENCE ET CONSEQUENCES

L'intérêt pour les technologies immersives est grandissant, mais leur industrialisation reste aujourd'hui complexe. Sur les lignes d'assemblages, même si leur utilisation pour faciliter la mise en œuvre du montage de systèmes mécaniques est avérée, le déploiement à grande échelle de la réalité augmentée n'est pas encore effectif. Les industriels souhaitent tout d'abord identifier quelles sont les applications qui nécessitent le développement de gammes d'assemblage virtuelles. En effet, Alarcon et al. [22] montrent que pour le secteur spatial, avec ses nombreuses spécificités, la réalité augmentée n'apporte pas d'amélioration en termes de sécurité. De leur côté, Drouot et al. [23] ont mené une étude pour mettre en évidence le gain en productivité apporté par la réalité augmentée. Les résultats indiquent qu'une distinction doit être réalisée entre les assemblages complexes et les assemblages simples. En effet, dans le cas d'assemblages simples, il n'a pas été observé de gain en productivité lorsque les instructions de montage étaient données de manière virtuelle et interactive [24]. En revanche, dans le cas d'assemblages complexes les temps d'exécution et les erreurs de montage sont réduits [23].

Un deuxième verrou à lever avant de pouvoir déployer industriellement la réalité augmentée concerne son acceptabilité par les opérateurs ainsi que son impact sur la santé. Dans l'étude menée avec des étudiants par Seitier et al. [25], les lunettes HoloLens sont bien acceptées et permettent aux étudiants d'acquérir les compétences attendues. Cependant, différentes technologies de visualisation des éléments virtuels existent aujourd'hui et leur impact sur la santé des personnes et la charge mentale varie. Des solutions de projection ou de visualisation des éléments virtuels sur des écrans déportés permettent à l'opérateur de disposer de ses mains librement pour exécuter les tâches qui lui sont confiées. Dans le cas du poste d'assemblage développé par Seitier et al. [7], la caméra est face à l'opérateur. Le contenu de réalité augmentée visualisé par l'opérateur est donc différent de celui perçu de son point de vue. Cette inversion entre les points de vue complexifie la compréhension des instructions de la gamme de montage. Le bénéfice procuré par l'utilisation de la réalité

augmentée est alors diminué. Une solution alternative consisterait à modifier la position de la caméra en l'installant derrière l'opérateur afin d'assurer que le champ de vision de l'opérateur et celui de la caméra soient similaires. Par ailleurs, le port de lunettes de réalité augmentée garantit également à l'opérateur de disposer de ses mains. Cependant, l'impact de ces lunettes et de l'ajout d'éléments virtuels dans le champ de vision sur la santé doit encore être démontré même si certaines études abordent cette problématique [26]. Une gêne visuelle peut apparaître lorsque ce type d'équipement est utilisé de manière continue. Pour diminuer le contenu des éléments virtuels et soulager la vision des opérateurs, une solution qui peut être envisagée est l'ajout de commandes vocales. Les instructions de montage seraient alors énoncées ce qui limiterait le nombre d'éléments virtuels dans le champ de vision contribuant ainsi à diminuer les sollicitations visuelles.

#### 5. CONCLUSION

L'assemblage de pièces mécaniques par l'intermédiaire d'un système vis-écrou requiert de maîtriser le procédé de serrage pour que la fonction d'assemblage soit assurée. Le contrôle de l'ensemble des paramètres permettant d'aboutir à un serrage efficace et sécurisé de l'assemblage boulonné est alors primordial. Les méthodes employées aujourd'hui dans l'industrie, méthodes différentes en fonction du secteur d'activité, sont souvent longues et fastidieuses à mettre en œuvre. Avec le passage dans l'industrie du futur, les lignes d'assemblages deviennent digitales ce qui doit aboutir à une simplification des procédés d'assemblage. Elles exploitent les données numériques disponibles dès la conception des systèmes afin d'optimiser et d'améliorer les flux de production. L'utilisation croissante des outils connectés apporte une quantité conséquente de données en temps réel pendant les phases de serrage. En traitant ces données, il est désormais possible d'avoir une maîtrise complète du serrage, de la phase d'accostage jusqu'au couple de serrage final appliqué. Cette connectivité des nouveaux outils associée avec la réalité augmentée facilite donc la mise en œuvre du serrage. Les éléments virtuels (jumeaux numériques et instructions) sont superposés aux composants réels à travers diverses solutions matérielles (écran, lunettes, projection, etc.). En utilisant le champ visuel 3D des opérateurs, la compréhension des gammes d'assemblage est facilitée notamment lorsque le système mécanique à assembler est complexe. Cependant, l'utilisation de la réalité augmentée, particulièrement avec des lunettes, peut engendrer chez l'opérateur une fatigue et une gêne plus marquées que lors de l'utilisation de gamme d'assemblage décrites sur des procédures imprimées sur du papier. La réalité augmentée doit donc être pertinente pour l'assemblage considéré et ne pas, au contraire, diminuer la productivité. Les autres sens cognitifs pourraient être associés aux éléments virtuels, notamment l'ouïe avec des commandes vocales, afin de réduire le nombre d'éléments virtuels présents dans le champ de vision de l'utilisateur. Les stratégies de réalité

augmentée développées sont alors validées par des critères de productivité, mais également des critères liés à la perception de ces technologies immersives par les opérateurs.

L'exploitation des jumeaux numériques et des outils connectés assure, par ailleurs, une traçabilité des composants utilisés ainsi que de la méthode de serrage (notamment les valeurs de couple appliqué). Ces données sont primordiales lors des défaillances des assemblages. En effet, une expertise est alors menée afin de déterminer si le dimensionnement de la liaison ainsi que le serrage réalisé permettaient d'assurer l'intégrité de l'assemblage. La digitalisation du procédé d'assemblage doit donc rendre possible la localisation des éléments assemblés. Néanmoins, à l'heure actuelle, la position de la vis dans le système mécanique ne peut pas être connue avec certitude car les outils connectés, notamment les clés dynamométriques, ne sont pas géolocalisées dans l'environnement de travail. Dans des conditions normales l'opérateur positionne l'outil sur la vis qui est identifiée dans la gamme d'assemblage mais rien ne permet de garantir qu'il n'a pas réalisé le serrage d'une autre vis. Une solution technique afin de remédier à cette problématique est de localiser avec précision les outils de serrage. Une fois que la localisation est validée, la commande du couple à appliquer pourrait être directement envoyée par la gamme d'assemblage numérique à la clé dynamométrique.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à la réalisation de ces travaux de recherche et notamment les entreprises *Safran Engineering Services* et *Diota* pour leur expertise et le développement du module liant les outils connectés et le logiciel Diota®.

## REFERENCES

- [1] Reljić V., Milenković I., Dudić S., Šulc J., Bajči B. Augmented reality applications in industry 4.0 environment. *Applied Sciences*, 11(12):5592, 2021.
- [2] Milgram P., Kishino F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, E77-D(12), 1994.
- [3] Nee A.Y.C., Ong S.K., Chryssoulouris G., Mourtzis D. Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing technology*, 61(2):657-679, 2012.
- [4] Fite-Georgel P. Is there a reality in industrial augmented reality?. 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 201-210, 2011.
- [5] Kaufmann H., Schmalstieg D. Mathematics and geometry education with collaborative augmented reality. *Computers & Graphics*, 27(3):339-345, 2003.
- [6] Kamphuis C., Barsom E., Schijven M., Christoph N. Augmented reality in medical education?. *Perspectives on Medical Education*, 3(4):300-311, 2014.
- [7] Seitier P., Gilles P. Réalité augmentée en enseignement : l'outil ou la science?. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. Hal-03296135
- [8] Bortolini M., Ferrari E., Gamberi M., Pilati F., Faccio M. Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):5700-5705, 2017.
- [9] Qiu C., Zhou S., Liu Z., Gao Q., Tan J. Digital assembly technology based on augmented reality and digital twins: a review. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(6):597-610, 2019.
- [10] Danielsson O., Syberfeldt A., Holm M., Wang L. Operators perspective on augmented reality as a support tool in engine assembly. *Procedia CIRP*, 72:45-50, 2018.
- [11] Marino E., Barbieri L., Colacino B., Fleri A.K., Bruno F. An augmented reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments. *Computers in Industry*, 127:103412, 2021.
- [12] Abdallah H.B., Jovančević I., Orteu J.-J., Brèthes L. Automatic inspection of aeronautical mechanical assemblies by matching the 3D CAD model and real 2D images. *Journal of Imaging*, 5(10):81, 2019.
- [13] Eswaran M., Gulivindala A.K., Inku A.K., Raju Bahubalendruni M.V.A. Augmented reality-based guidance in product assembly and maintenance/repair perspective: A state of the art review on challenges and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 213:118983, 2023.
- [14] Serván J., Mas F., Menéndez J.L., Ríos J. Using augmented reality in AIRBUS A400M shop floor assembly work instructions. The 4th manufacturing engineering society international conference, CADIZ, Spain, 633-640, 2012.
- [15] Dalle Mura M., Dini G. Augmented reality in assembly systems: state of the art and future perspectives. 9th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar - S. Ratchev (Ed.) IPAS 2020, IFIP AICT 620:3-22, 2021.
- [16] Kellerman R., Untersuchungen über den einfluß der reibung auf vorspannung und anzugsmoment von schraubenverbindungen. *Konstruktion*, SpringerVerlag 2, 1955.
- [17] Bickford J.H. Introduction to the design and behavior of bolted joints – Non-gasketed joints. 4ème édition, Boca Raton : CRC Press – Taylor & Francis Group, 2008.
- [18] Khomenko A., Koricho E.G., Haq M., Cloud G.L. Bolt tension monitoring with reusable fiber Bragg-grating sensors. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 51(2):101-108, 2016.
- [19] Okorn I., Nagode M., Klemenc J., Oman S. Analysis of additional load and fatigue life of preloaded bolts in a flange joint considering a bolt bending load. *Metals*, 11(3):449, 2021.
- [20] Foissac C., Daidié A., Segonds S., Chirol C. Vers un serrage intelligent dans les assemblages aéronautiques. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mars 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. Hal-03296145
- [21] Dols S. Développement d'une nouvelle méthode de serrage intelligente pour le contrôle des assemblages boulonnés. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. INSA de Toulouse, 2016. Français. NNT :2016ISAT0038. tel-02083610
- [22] Alarcon R., Wild F., Perey C., Genescà M.M., Martínez J.G., Ruiz Martí J.X., Simon Olmos M.J., Dubert D. Augmented reality for the enhancement of space product assurance and safety. *Acta Astronautica*, 168:191-199, 2020.
- [23] Drouot M., Le Bigot N., Bricard E., De Bougrenet J.L., Nourrit V. Augmented reality on industrial assembly line: Impact on effectiveness and mental workload. *Applied Ergonomics*, 103:103793, 2022.
- [24] Rodriguez F.S., Saleem K., Spilski J., Lachmann T. Performance differences between instructions on paper vs digital glasses for a simple assembly task. *Applied Ergonomics*, 94:103423, 2021.
- [25] Seitier P., Gilles P., Boudier V., Galaup M., Lagarrigue P. Getting started procedure of a NC machine simplified by the use of a mixed-reality training scenario. *MATEC Web of Conferences*, 368:01018, 2022.
- [26] Drouot M., Le Bigot N., Bolloc'h J., Bricard E., De Bougrenet J.L., Nourrit V. The visual impact of augmented reality during assembly task. *Displays*, 66:101987, 2021.

# Développement de Jumeau Numérique pour la Formation au sein du pôle S.mart RAO

Philippe Pernelle <sup>a,\*</sup>, Thibault. Carron <sup>b\*</sup>, Stéphane. Talbot <sup>b\*</sup>, David. Wayntal <sup>b\*</sup>

<sup>a</sup> Université de Lyon1/ Pôle S.mart RAO

<sup>b</sup> Université de Savoie Mont-Blanc

\* e-mail : [philippe.pernelle@univ-lyon1.fr](mailto:philippe.pernelle@univ-lyon1.fr), [{prenom.nom}@univ-smb.fr](mailto:{prenom.nom}@univ-smb.fr)

## 1. INTRODUCTION

Les trois principales révolutions industrielles ont été caractérisées par des "sauts" technologiques importants : machine à vapeur, l'énergie électrique, les micro-processeurs, ... Or, depuis maintenant plusieurs années, l'Industrie 4.0 [1] se présente comme la quatrième révolution industrielle caractérisée par la prédominance des technologies Internet. L'industrie 4.0 a vocation à changer la façon de produire des biens manufacturiers. Dans ce contexte les produits deviennent des systèmes complexes (Cyber-Physical Systems) [2]. Dans la continuité de ce paradigme, le jumeau numérique introduit le concept de produit virtuel couplé à un produit physique.

L'industrie 4.0 impacte les entreprises, leur organisation, et donc implicitement le personnel en charge de la production. Ceux-ci ont besoin d'être formés à cette transition, mais paradoxalement, la formation n'est pas considérée à sa juste valeur, alors même qu'elle est un enjeu fondamental de toute conduite de changement.

Cet article propose une approche spécifique de la formation et de la conduite du changement en s'appuyant sur le jumeau numérique (JN) comme un facilitateur. Nous définissons le JNF (Jumeau Numérique pour la Formation) dont l'objectif est d'étendre l'usage standard d'un JN (prototypage, industrialisation, maintenance, ...) à celui de la formation. Le JNF est un concept de modélisation globale basé sur un méta-modèle de ressources multi-facettes (RMF).

Dans la première section nous rappelons les enjeux du jumeau numérique dans le contexte de l'industrie 4.0. Puis dans la deuxième section nous présentons notre approche autour du concept de JNF. Enfin dans la dernière section nous illustrons notre démarche avec plus cas d'étude réalisés au sein du pôle S.mart RAO

## 2. INDUSTRIE 4.0 ET JUMEAU NUMERIQUE

Le concept d'Industrie 4.0 [1] définit une nouvelle organisation des usines basée sur une flexibilité accrue de la production et sur l'optimisation des ressources. Ce concept est issu des axes stratégiques du gouvernement Allemand. En France, dans son rapport de synthèse, le GIMELEC [3] identifie trois points clef de la démarche allemande.

1. Une usine numérique et flexible : les outils numériques permettent une communication continue et instantanée entre tous les acteurs, mais aussi entre les équipements et les produits.
2. Une usine avec des outils de simulation et de traitement de données : le recueil des données produites par les différents éléments de la chaîne de production permet également de produire une réplique virtuelle de tout ou partie de cette chaîne afin de générer des simulations de procédés ou des tests.
3. Une usine économe en énergie et en matières premières : les réseaux de communication, les capteurs, la virtualisation permettent d'optimiser les dépenses énergétiques et de diminuer les déplacements

### 2.1. Paradigmes du Jumeau Numérique

Le Jumeau Numérique est un concept relativement simple qui a été introduit dans le cadre des travaux sur les systèmes PLM [4]. Le Jumeau Numérique met en évidence trois éléments : un produit physique, une représentation virtuelle de ce produit, des échanges de données bidirectionnel entre le produit physique et le produit virtuel.

Pour autant, il n'existe pas de modèle standard d'un Jumeau Numérique [5,6]. Dans leur article [7], les auteurs ont analysé un corpus de 92 articles et ont mis en évidence 13 caractéristiques du jumeau numérique. Dans l'article [8], les auteurs proposent de considérer le jumeau numérique sur 5 dimensions (Entités physique, Modèles virtuels, Services, Données, Connexions). La mise en évidence des services permet de contextualiser la manière dont les données vont pouvoir circuler entre l'environnement réel et l'environnement virtuel. Ces échanges de données sont un point essentiel dans la mise en œuvre du jumeau numérique.

## 2.2. Une intégration partielle du JN

Certains proposent de distinguer des sous-niveaux de jumeau numérique en fonction du niveau d'intégration des données [9] :

- Le niveau DM (Digital Model) caractérise une représentation qui n'utilise aucune forme d'échange automatisé de données entre l'objet physique et l'objet numérique.
- Le niveau DS (Digital Shadow) caractérise un modèle numérique avec un flux de données unidirectionnel entre l'état d'un objet physique et d'un objet numérique
- Le niveau DT (Digital Twin) caractérise un modèle numérique avec les flux de données bidirectionnels.

Les auteurs [9] montrent que les cas d'étude sur le niveau DT sont faibles (2.38% des publications). Les auteurs identifient aussi que le second domaine le plus ciblé est la maintenance. Le DM est le plus étudié dans les phases de conception pour réaliser des prototypes virtuels. Ceci est dû au fait que le DM soit intrinsèquement géré par les systèmes PLM. Ces analyses démontrent que les cas d'étude d'un Jumeau Numérique complet (avec des échanges de données bidirectionnelles) sont très peu mis en œuvre

## 3. LE JUMEAU NUMERIQUE POUR LA FORMATION

Le JNF (Jumeau Numérique pour la Formation) [13] est une approche de modélisation d'un jumeau numérique qui intègre de multiples facettes dont celles qui permettent son usage en formation. Le JNF est basé sur nos précédents travaux [10,11] et s'appuie sur la notion de ressources multi-facettes.

### 3.1. Notion de ressources multi-facettes

Une ressource multi-facettes (MFR: Multi-Facet Resource) est un artefact conceptuel permettant de définir la structure et l'usage d'un objet (théorique, technologique, ludique, pédagogique, etc.) dans un contexte qui n'est pas son contexte d'origine. Plus formellement, une MFR est constituée de vues/facettes qui agrègent des groupes d'ensemble d'éléments descriptifs et de protocoles. La Figure 1 décrit le méta-modèle d'une MFR.

Un modèle de ressource multi-facettes est une réalisation du méta-modèle précédent, regroupé selon plusieurs catégories :

- Modèle structurelle qui décrit la structure des facettes,
- Modèle d'usage qui décrit l'usage des liens entre les facettes. Ces liens permettent de décrire les caractéristiques entre les éléments génériques et différentes facettes.
- Modèle de configuration qui décrit la configuration des outils ou des ressources nécessaires, en particulier pour l'intégration des flux de données.

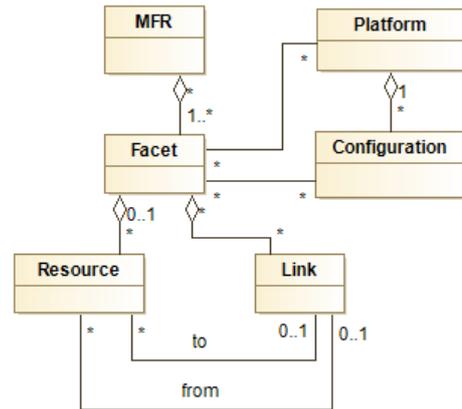


Figure 1 - Méta-modèle d'une MFR

Une ressource multi-facettes est donc une instance d'un modèle, et est composée de ressources élémentaires ainsi que de liens exploitables grâce aux données de configuration. Cette approche de modélisation a été utilisée et expérimentée dans plusieurs processus de formation [10,11] notamment pour intégrer des petits robots mobiles (type MBot) et ainsi que des objets IoT dans un environnement de Jeu Sérieux et dans une plateforme LMS (Claroline Connect). Ces ressources ont pu être utilisées en formation initiale (niveau L2, L3).

### 3.2. Modélisation d'un JNF

Même si on peut conceptualiser le jumeau numérique comme un ensemble indicible, la modélisation avec une RMF permet une agrégation de ressources très diverses. Cette approche permet notamment de construire de façon itérative le jumeau numérique en complétant les ressources utiles selon le besoin. Ainsi, nous définissons le modèle *Digital Twin for Training* (D2T) répartie en trois sous-modèles.

Sur les aspects structurels, nous proposons de définir quatre facettes :

- La facette *DigitalModel* qui va regrouper les ressources de la maquette numérique du produit. Cette maquette numérique est gérée dans sa globalité au sein d'un système PLM,
- La facette *PhysicalSystem* qui va regrouper les ressources liées aux instances physiques du produit,
- La facette *VirtualSystem* qui va regrouper les ressources virtuelles du produit,

- La facette *Training* qui va regrouper les ressources pédagogiques en lien avec le produit.

L'ensemble des ressources associées aux facettes permet de structurer les informations. Par exemple, dans la Figure 2, la facette *DigitalModel* regroupe des références vers des identifiants uniques d'un système PLM ainsi que des simulations de certaines fonctions. La facette *VirtualSystem* gère des *GameObjects* (terme générique pour désigner un objet graphique géré par un moteur 3D temps réel, comme Unity3D, Unreal, JavaMonkeyEngine, ...).

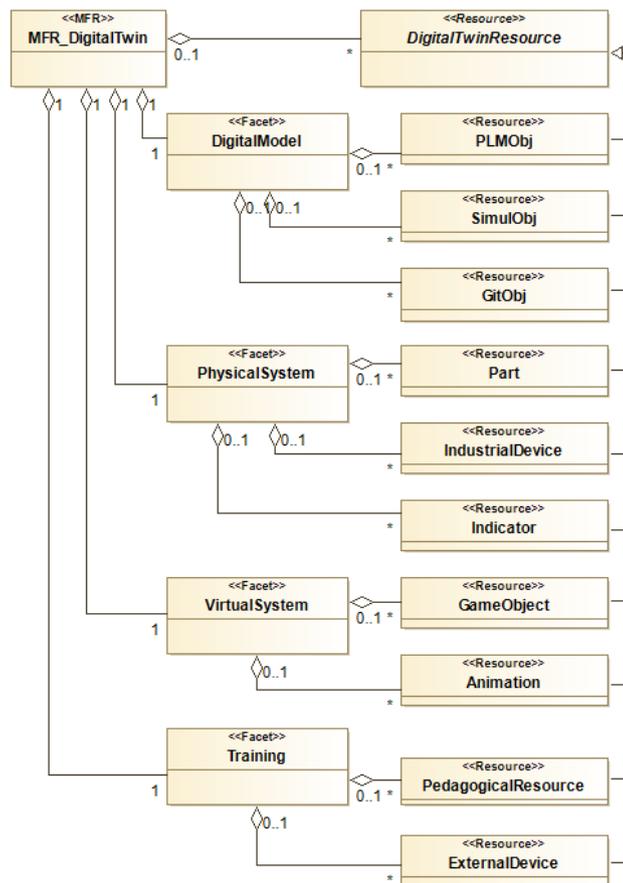


Figure 2 - Extrait du modèle structurelle D2T

Le modèle d'usage permet de lier les ressources des différentes facettes entres-elles. Chaque lien porte une sémantique propre qui permettra un usage spécifique. La liste suivante décrit les principaux liens utilisés :

- Le lien *ModelingLink* permet de lier une ressource physique à un modèle numérique ou une simulation.
- Le lien *NotificationLink* permet de créer un canal de notification entre un indicateur et une ressource virtuelle ou une ressource numérique.
- Le lien *UsualLink* permet de lier une ressource/composant/outil quelconque à sa représentation 3D ou VR.
- Le lien *SimulLink* permet de lier une ressource 3D à un modèle de simulation,
- Le lien *EvaluationLink* permet de lier un canal de notification/information ou d'échange avec un compte d'un réseau social.

Outre la sémantique propre à chaque lien, nous proposons aussi d'associer pour chaque lien des propriétés optionnelles sous la forme d'un ensemble de contrainte et/ou d'un ensemble de service définies dans le modèle de configuration.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les MFR ont vocation à agréger des données issues de systèmes très divers qui n'ont pas toujours des capacités d'interopérabilité. Le modèle de configuration a pour but de remédier en partie à ce problème en proposant de caractériser les plates-formes et configurations associées aux facettes. La notion de configuration est très générique et permet de définir aussi des structures de paramétrage ou des mécanismes d'accès (exposition publique d'url ou de service). Le modèle de configuration doit permettre d'automatiser l'usage des liens d'usage. La Figure 3 présente un extrait des plateformes et configurations associées à une D2T.

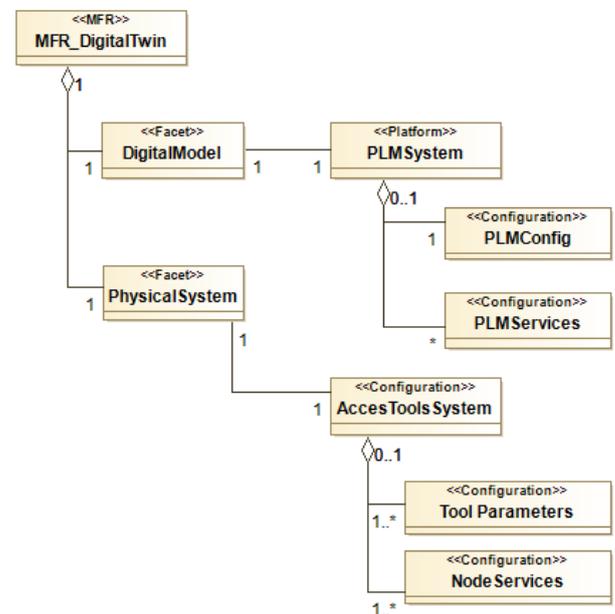


Figure 3 - Extrait du modèle structurelle D2T

Les trois sous-modèles présentés ci-dessus permettent de modéliser une D2T et donc de caractériser un jumeau numérique. Pour chaque jumeau numérique, une instance pour chaque modèle devra être établie (dans notre cas, nous utilisons une représentation des instances sous forme de structure json). Dans la section suivante, nous détaillons deux exemples de modélisation de D2T au travers un système cyber-physique et d'un simulateur de Kart ainsi que leur usage dans un processus de formation.

#### 4. EXPERIMENTATION DU JUMEAU NUMERIQUE POUR LA FORMATION

Dans cette section nous abordons la réalisation de JNF au travers deux exemples.

#### 4.1. Les ressources d'un JNF

Le JNF s'appuie sur une architecture logicielle dont un système d'information industriel. De plus Il s'appuie aussi sur des développements spécifiques permettant de faire fonctionner des équipements de Réalité Virtuelle. Parmi ces outils, on peut citer ;

- Les outils de gestion de la maquette numérique (PLM)
- Les outils de simulation
- Les systèmes de forge logicielle
- Un moteur 3D

En plus de ces outils « métiers », nous avons initié une API pour manipuler des JNF et permettre une interopérabilité minimaliste ainsi que l'usage des équipements RV/RA. Le Tableau 1 récapitule les ressources utilisées au sein du pôle S.smart RAO et des universités de Lyon 1 et Savoie Mont-Blanc.

Tableau 1 – ressources utilisées pour le JNF

Catégories	Outils utilisés	Structure
PLM	Windchill, 3DExp	S.smart RAO
Forge	Gitlab	USMB
Moteur 3D /VR	Unity3D	S.smart RAO USMB
Simulation	OpenModelica , Scilab	S.smart RAO USMB
Equipement RV	Oculus, HTC,	S.smart RAO USMB
API	C# / Unity3D / NodeJS / Docker	USMB

#### 4.2. Exemple de JNF : plateforme HSD

Le premier JNF réalisé, nommé HSD (cf. Figure 4 et Figure 5), est une plate-forme de stockage et de chargement de drone.

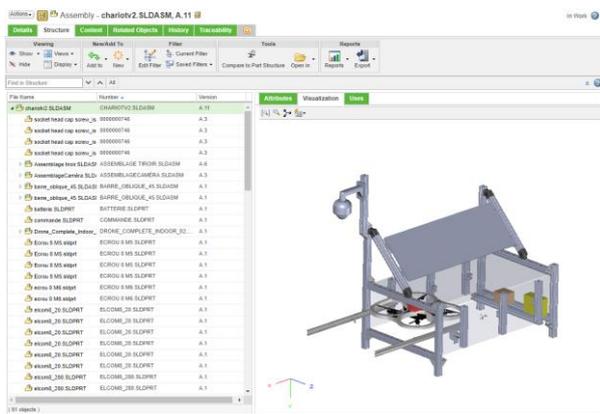


Figure 4 – Modèle de la plateforme HSD (Home Sweet Drone) sous Windchill

C'est un système cyber-physique intégrant des fonctions mécaniques (ouverture avec des moteurs), des fonctions électriques (alimentation par panneau solaire, contrôle de charge), des logiciels (pilotage des caméras, des capteurs météorologiques et de l'ouverture).

Le système HSD est autonome d'un point de vue énergétique et accessible à distance via le système LORA. HSD est une plateforme qui a été développée dans le cadre de la formation IoT Campus Numérique.



Figure 5 – Prototype physique de la plateforme HSD

Les instances de D2T sont manipulées sous forme de structures JSON. L'ensemble des extraits présenté dans les paragraphes suivants est sous forme JSON. Ce type de structure, plus simple d'XML, permet le stockage et le traitement rapide de données multi types, notamment dans le cadre de service REST

Le Tableau 2 et 3 montrent un extrait du modèle de configuration et du modèle structurel. Ces extraits, très partiels, illustrent l'approche « métadonnée » d'une RMF. Sur la facette DT nous identifions les ressources liées à la conception, notamment un identificateur sur le système PLM.

Tableau 2 – extrait de la D2T Configuration

```

{ "platforms": [
  { "platform": "PLMsystem",
    "name": "windchill",
    "configurations": [
      { "config": "PLMConfig",
        "type": "access",
        "path": "http://../Windchill/ } }},
  { "platform": "SimulationTool",
    "name": "Scilab",
    "configurations": [
      { ... }
    ]
  }
]
}

```

Sur la facette *PhysicalSystem*, nous identifions les systèmes physiques réalisés ainsi que les sous-systèmes. Dans cet exemple, le système vidéo et le système météorologique sont considérés comme des sous-systèmes. Sur cette facette, nous définissons aussi les ressources de type "indicateur" qui sont généralement associées à des capteurs. Sur la facette *VirtualSystem*, on identifie les différents objets 3D et les animations qui vont être associés au jumeau numérique.

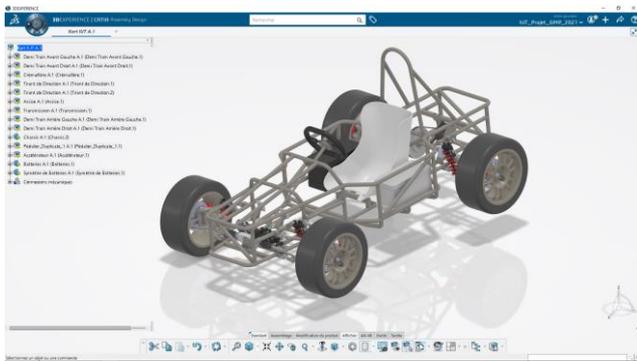
**Tableau 3 – extrait de la D2T structurelle**

```

{"MFR_DigitalTwin": "HSD",
 "description": "Home Sweet Drone",
 "facets": [
  {"facet": "DigitalModel",
   "resources": [
    [{"PLMObj": [
      {"UID": "chariotv2.SLDAS",
       "name": "Platform HSD",
       "platform": "PLMsystem"}
    ]
   }
  ],
  {"facet": "PhysicalSystem",
   "resources": [
    [{"part": [
      ...
    ]
   }
  ],
  {"facet": "VirtualSystem",
   "resources": [
    [{"GameObject": [
      {"UID": "HSD.prefab",
       ...
    ]
   }
  ]
 }
 
```

**4.3. Exemple de JNF : Simulateur de Kart**

Le second exemple de JNF est un simulateur de Kart électrique. Ce JNF a vocation à être utilisé dans un cours sur les moteurs électriques. La Figure 6 montre la maquette numérique réalisée avec 3DExp.



**Figure 6 – Modèle du Kart sous 3DExp**

La réalisation partielle du kart (siège et commandes) qui nous a permis de réaliser des tests en 3D et en Réalité Virtuelle.

**4.4. Usage des JNF**

Les JNF ont vocation à être utilisés dans des processus de formation en utilisant un environnement 3D basé sur une plateforme de jeu sérieux. Le choix de ne pas utiliser des outils intégrés comme 3DExp est justifié par le fait que les usages attendus sont complexes (fortes interactions avec les PNJ et les objets). De plus, ces usages ne doivent pas être restreint à une expertise d'un outils métier trop spécialisés notamment dans un contexte de formation ou de conduite de changement.

La plateforme d'usage en formation est basée sur une approche de jeu de rôle [12] de type RPG. Les joueurs (étudiants ou enseignants), représentés par leurs avatars, peuvent se déplacer dans un monde virtuel et réaliser diverses interactions avec ce monde (interagir avec des objets dont le système virtuel du JNF)

La Figure 7 montre le système virtuel de la plateforme HSD, importé dans le monde 3D/VR. Dans ce cas le vent est simulé et sa force dépend des capteurs physiques situées. De même la luminosité dans le monde 3D dépend

de capteurs de luminosité situé sur la plateforme physique



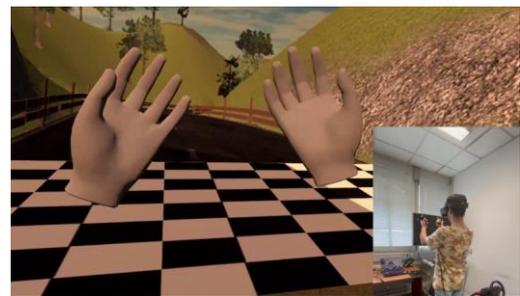
**Figure 7 – Usage de HSD dans un environnement 3D**

Les mécanismes d'importation que nous avons développés, convertissent des fichiers STEP en objets 3D, en gardant la structure de départ. La Figure 8 montre l'importation du modèle de kart et la structure d'objets 3D générés dans Unity3D.



**Figure 8 – Exemple d'importation Maquette numérique dans Unity3D**

La Figure 9 montre un usage en réalité virtuelle sans avatar. Dans ce contexte, seules les mains sont visibles et utilisées pour les déplacements et les interactions



**Figure 9 – Usage d'un casque RV sans avatar**

La Figure 10 montre un usage du système virtuel avec un casque RV dans le contexte du simulateur de kart. Ici, les interactions peuvent être avec des objets virtuels ou des objets réels (comme le volant par exemple).

Ces deux JNF n'ont pas encore été expérimentés avec un groupe d'étudiants au complet. En revanche nous avons utilisé un autre système, plus simple, dans un parcours complet (2 groupes de TP) sur un module d'asservissement en IUT GMP. Ce JNF est basé sur un robot mobile programmable. L'objectif de ce JNF était de pouvoir concevoir un régulateur PID avec Scilab et de le simuler dans un environnement 3D, avant de le tester sur un robot en réel. Les retours des étudiants ont démontré

un accroissement important de leur motivation, Malheureusement les mécanismes d'échanges de données entre le robot mobile et l'environnement 3D n'ont pas été concluant.



Figure 10 – Usage du simulateur de Kart avec d'un casque RV

## 5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Il serait restrictif de ne considérer que les problématiques du jumeau numérique sous l'angle de la modélisation. En tant qu'enseignant, nous avons voulu nous intéresser aux usages. D'ailleurs, un certain nombre d'industriels réfléchissent à de multiples usages : revue de projet, industrialisation, maintenance, gestion des risques, formation, gestion du changement, etc. Tous ces cas d'utilisation rendent difficile, voire impossible, une approche globale où la conception du produit et les usages du JN associé, seraient réalisés dans le même outil. Cet élément a motivé notre démarche qui est basée sur une approche du type « pseudo-interopérabilité ». C'est pour cette raison que nous avons proposé le concept de JNF (ou D2T). Cette approche est basée sur la notion de ressources multi-facettes et sur un modèle structuré autour de 4 facettes.

Afin d'illustrer et de valider notre approche, nous avons présenté dans cet article deux JNF partiels : une plateforme de drone et un simulateur de kart. Bien que partiel, ces deux prototypes illustrent le potentiel de cette approche. Nous avons déjà expérimenté la notion de ressource multi-facettes dans différents processus de formation mais jamais avec un jumeau numérique complet. Ce travail initial a toutefois permis de mettre en évidence deux aspects essentiels. Le premier intérêt c'est de faciliter l'importation de données issues de la maquette numérique vers un système virtuel indépendant (dans notre cas Unity 3D) et ceci même si cette importation se limite pour le moment à la structure. L'utilisation d'un tel environnement permet d'accéder à un moteur 3D couplé à un moteur de physique qui va notamment générer la gravité, les collisions, la simulation de processus risqués (feu, explosions, dégradation), l'interaction avec d'autres acteurs. Tous ces éléments permettent de mettre en œuvre des usages divers et complexes. Le second intérêt c'est de faciliter l'intégration de service externe via des protocoles standardisés (exemple : requête REST). Ces services permettent une mise œuvre d'accès à des capteurs ou des actionneurs externes.

Pour autant, malgré l'intérêt de notre approche par une structure de type métadonnée, l'intégration reste partielle et nécessite un travail complémentaire

important. L'intégration bidirectionnelle des données du système physique et du système virtuel reste problématique et nécessite des développements spécifiques. Pour réduire le travail de développement spécifique, nous souhaitons étudier une approche de type MDA. Dans cette logique, le modèle de configuration pourrait être entendu de façon à être équivalent à un PSM. Dans ce cas, la définition de règles de transformation (ATL) et de contraintes (OCL) devrait permettre d'augmenter la couverture d'automatisation.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions tous les acteurs qui ont contribué à ces travaux : les étudiants de l'IUT GMP et du département Info de l'Université de Savoie, le pôle Smart Rao (pour ses ressources), la région Auvergne Rhône - Alpes (financement).

## RÉFÉRENCES

- [1] Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J.: Securing the future of german manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0. Final report of the Industrie 4(0), 2013.
- [2] Lee E. A. : CPS foundations, Design Automation Conference, pp. 737-742. Anaheim, CA, USA, 2010.
- [3] Gimelec Consortium. Industrie 4.0 : l'usine connectée [online] disponible en ligne sur [PublicationsOutils/Industrie-4.0-l-usine-connectee-Publication](#), 2013.
- [4] Grieves M. : Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper, 2014.
- [5] Mengnan L., Shuiliang F., Huiyue D., Cunzhi X. : Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. Journal of Manufacturing Systems. 2021.
- [6] Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. : Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 51(11), pp. 1016-1022, 2018.
- [7] Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., Hicks, B.: Characterising the digital twin: A systematic literature review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, pp. 36–52, 2020
- [8] Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., Nee, A.: Enabling technologies and tools for digital twin. Journal of Manufacturing Systems, 2019.
- [9] Fei, T., Jiangfeng, C., Qinglin, Q., Zhang, M., Zhang, H., Fangyuan, S.: Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 94(9-12), pp. 3563–3576, 2018.
- [10] Abed, H., Pernelle, P., Amar, C.B., Carron, T.: Serious games for vocational training: A compared approach. In: 2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA). pp. 1–8. IEEE, 2016.
- [11] Abed, H., Pernelle, P., Carron, T., Talbot, S., Wayntal, D., Amar, C.B.: A gamification approach for serious games. In: 2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE). pp. 551–558. IEEE, 2018.
- [12] R. Baptista and C. Vaz de Carvalho, "Funchal 500 years: Learning through role play games," in 2nd European Conference on Games Based Learning (Academic Publishing International), Barcelona, Spain, pp. 25–30, 2008,
- [13] P. Pernelle, T. Carron, S. Talbot, D. Wayntal : "Digital Twin and Ecological Transition Integration in Training Process", Proceedings of IEEE International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Flicenflac, Mauritius, pp. 596, 2021.

# Mesure de température du bain fondu en fabrication additive avec une caméra RGB

L. Jegou <sup>a,b,\*</sup>, J. Lachambre <sup>a</sup>, N. Tardif <sup>a</sup>, T. Elguedj <sup>a</sup>, V. Kaftandjian <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Univ.Lyon, INSA Lyon, CNRS, Lamcos, UMR5259, 69100, Villeurbanne, France

<sup>b</sup> Univ.Lyon, INSA Lyon, LVA, 69100, Villeurbanne, France

\* e-mail : loic.jegou@insa-lyon.fr

## 1. INTRODUCTION

La fabrication additive de pièces métalliques est une technologie qui s'est améliorée en continue depuis les dix dernières années. Elle consiste à fabriquer une pièce en ajoutant de la matière, couche par couche. [1] est un passage en revue des différentes technologies qui existent et de leurs challenges respectifs. Ce papier se concentre plus particulièrement sur deux procédés : la Fabrication Directe par Projection Laser (avec de la poudre), et la fabrication type soudage arc-fil.

Le premier consiste à fondre une petite portion du substrat en surface avec une source laser, et à apporter de la matière sous forme de poudre de manière continue [2]. Le second est plus répandu car il permet la production de pièce plus grande plus facilement. Il consiste à fondre du métal d'apport sur le substrat avec un apport de chaleur créé par un arc électrique [3]. Ces deux procédés ont de nombreux paramètres qui impactent les propriétés mécaniques des pièces produites [4]. Le bain fondu est une zone critique lors de la fabrication et c'est un très bon indicateur de la formation des défauts [5] : apparitions de porosités, manque de fusion... Il existe différentes façons d'observer et de contrôler cette zone, et chaque méthode présente ses avantages et ses inconvénients : un champ de vue global ou réduit, une résolution plus ou moins fine, dans le domaine visible ou infrarouge... Les méthodes non-intrusives sont généralement privilégiées car les mesures par contact peuvent introduire des erreurs non négligeables [6]. Par exemple, la radioscopie est une méthode non-intrusive très intéressante pour observer l'intérieur d'une pièce [7], mais c'est une méthode coûteuse à mettre en place et qui requiert une instrumentation conséquente. L'imagerie optique permet d'observer la surface du bain et de contrôler par exemple sa forme [8,9]. Toutefois, l'identification des contours de la zone fondue est souvent un problème assez complexe,

et l'imagerie optique est couplée à l'imagerie thermique pour observer le champ de température.

Les caméras infrarouges sont largement utilisées pour cet aspect, à la fois en FPD [10] et en Arc-Fil [11]. Ces appareils restent encombrants et parfois difficilement adaptables sur d'autres procédés, et coûteux par rapport à des caméras CMOS (« *Complementary Metal Oxide Semiconductor* ») ou CCD (« *Charged Coupled Device* ») avec une résolution similaire.

L'imagerie thermique est aussi faisable dans le domaine proche-infrarouge [12] et dans le domaine visible puisque le principe reste le même. Ces méthodes se basent sur de la spectroscopie ou de la pyrométrie. Dans les deux cas, l'émissivité de la surface est un facteur clé dans le calcul de la température [13]. En fabrication additive, il a été montré qu'elle varie autour du bain fondu, lorsque la température augmente [14], ce qui complique les méthodes de mesures avec un champ de vue global.

La pyrométrie à plusieurs couleurs a été introduite il y a une trentaine d'années [15] et il a été montré que plus de deux couleurs n'apportait pas d'avantage significatifs au niveau de la précision de la mesure. Par ailleurs, la pyrométrie multi-chromatique est plus intéressante dans le domaine visible que l'infrarouge [16]. Différentes méthodes ont été envisagées pour effectuer ce genre de mesures. L'une d'elles est constituée de 2 caméras CCD montées sur un appareil avec un miroir divergent qui sépare le chemin optique en deux [17]. Chaque nouveau chemin est équipé d'un filtre à une longueur d'onde précise, et ce dispositif permet de faire de la mesure bichromatique. D'autres dispositifs existent avec des montages différents [18]. Dans toutes ces études, le temps d'exposition de la caméra est un facteur très important. Des temps d'expositions faibles permettent d'observer des zones très lumineuses et donc plus chaudes, tandis que des temps d'expositions plus long permettent

d'observer des zones plus froides. Il y a donc un compromis à faire sur ce paramètre, et l'observation de zones avec des gradients thermiques importants reste problématique.

C'est pourquoi une approche avec plusieurs temps d'exposition a été choisie pour cette étude, pour étudier des zones avec une forte variation de température. La solution présentée est compacte et combine une bonne résolution spatiale avec une thermographie fiable. Il s'agit d'une caméra CMOS avec :

- Une résolution de  $6.9 \mu\text{m} \times 6.9 \mu\text{m}$ ,
- Une imagerie avec multi-temps d'exposition en temps réel,
- Un filtre RGB dans le visible où 2 des 3 canaux sont utilisés pour calculer la température.

Dans un premier temps, quelques rappels sur la loi de Planck sont donnés et la calibration du système est détaillée. Enfin, la dernière partie est une application de cette méthode sur les procédés de fabrication FPD et Arc-Fil où les contours du bain fondu et les gradients thermiques sont tracés sur les images.

## 2. METHODOLOGIE

### 2.1. Théorie

La température ( $T$  en Kelvin) d'un objet à une longueur d'onde donnée ( $\lambda$  en mètres) augmente avec le flux lumineux qu'il émet (*i. e.* sa luminance notée  $L(\lambda, T)$  en  $W \cdot m^{-3} \cdot sr^{-1}$ ). Elle dépend également de l'émissivité ( $\varepsilon$ ) de sa surface, comprise entre 0 et 1.

On distingue 2 types de corps particuliers :

- Le corps noir : il absorbe tous les rayonnements qui arrivent sur sa surface. Sa luminance est notée  $L^0$  et son émissivité est égale à 1 ( $\varepsilon_0 = 1$ ).
- Le corps gris : dont l'émissivité ne dépend pas de la longueur d'onde.

L'approximation de Wien de la loi de Planck permet de calculer la luminance d'un corps noir en fonction de sa température pour une longueur d'onde donnée :

$$L^0(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{T\lambda}\right)}, \quad (1)$$

Où  $C_1 = 2hc^2 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$  et  $C_2 = \frac{hc}{k} m \cdot K$  sont deux constantes avec :

- $h = 6,626 \times 10^{-34} J \cdot s$  (Constante de Planck)
- $k = 1,3806 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$  (Constante de Boltzmann)
- $c = 2,9979 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$  (Célérité de la lumière)

Un corps quelconque absorbe seulement une partie du rayonnement incident, et la quantité restante est réfléchi. Ainsi, sa luminance est la somme du flux qu'il émet, et du flux qu'il réfléchit via un environnement translucide avec une transmittance  $\tau$  (généralement l'air). Dans le cadre de cette étude, le flux réfléchi par l'environnement extérieur est négligeable par rapport au

flux émis car les températures étudiées sont très élevées ( $\geq 1000 K$ ). De plus, la luminance d'une surface quelconque à une température  $T_s$  est nécessairement égale à la luminance d'un corps noir à une température différente  $T_{CN}$  tel que :

$$L(\lambda, T_s) = \varepsilon_s \times \tau \times L^0(\lambda, T_s), \quad (2)$$

$$= L^0(\lambda, T_{CN}).$$

Cette équation nécessite de connaître l'émissivité du corps en question pour évaluer sa température. Cette grandeur dépend de nombreux paramètres (la rugosité, l'orientation ou la température de la surface, et la longueur d'onde à laquelle elle est mesurée). La méthode bichromatique consiste à réaliser 2 mesures à deux longueurs d'ondes différentes ( $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ ) pour obtenir une expression de la température en fonction du ratio des émissivités :

$$T_s = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}{5 \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) + \ln\left(\frac{L^0(\lambda_1, T_1)}{L^0(\lambda_2, T_2)}\right) + \ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda_2)}{\varepsilon(\lambda_1)}\right) + \ln\left(\frac{\tau(\lambda_2)}{\tau(\lambda_1)}\right)}. \quad (3)$$

La transmissivité de l'environnement entre la caméra et la surface est supposée constante en fonction de la longueur d'onde ( $\frac{\tau(\lambda_2)}{\tau(\lambda_1)} = 1$ ), et il est possible de faire l'hypothèse de corps gris sur une bande spectrale étroite ( $\frac{\varepsilon(\lambda_2)}{\varepsilon(\lambda_1)} = 1$ ). Dans cette étude, l'objectif est de mesurer la température à l'aide d'une caméra RGB (*Red Green Blue*), où deux des trois canaux seront utilisés dans l'équation (3).

### 2.2. Système de mesure

Le système de mesure utilisé est une caméra embarquable haute performance (IOI Victorem 51B136) avec une réponse spectrale dans le visible. Elle est équipée avec un capteur Sony IMX250, un filtre infrarouge et un filtre bayer pour avoir des images en couleurs. Les réponses spectrales de tous ces composants sont connues via les données constructeurs (Figure 1).

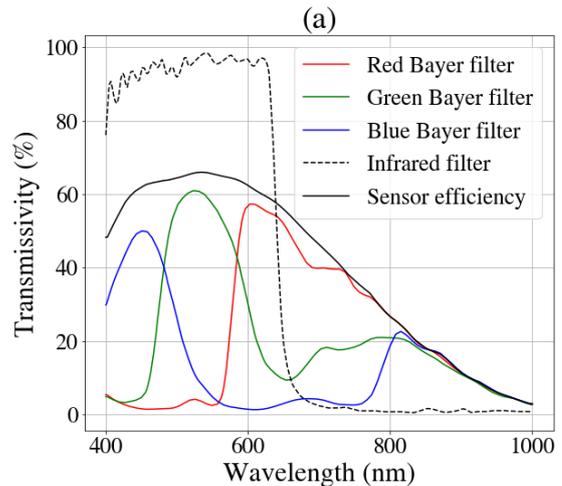


Figure 1: Réponse spectrale de la caméra.

Grâce à ces informations, il est possible de calculer théoriquement l'intensité lumineuse d'un objet observé via cette caméra, dans deux canaux de couleurs ( $I_{th_{rouge}}$  et  $I_{th_{vert}}$ ) puis de déterminer numériquement les températures  $T_1$  et  $T_2$  de l'équation (3) lors de la phase de calibration puisque la relation entre l'intensité théorique d'un corps et sa température est connue.

### 2.3. Calibration

La caméra est calibrée sur un corps noir (HGH infrared RCN1250) pour des températures entre 900 et 1470 K, et une lampe à ruban de tungstène (Osram W1 17 G) pour des températures entre 1900 et 2300 K). Ces deux systèmes sont placés perpendiculairement à l'axe optique, et le flux lumineux est mesuré sur la caméra.

Les profils des intensités théoriques ( $I_{th}$ ) dans les canaux rouge et vert sont tracés en fonction de l'intensité expérimentale mesurée sur le corps noir et la lampe à ruban de tungstène sur la Figure 2.

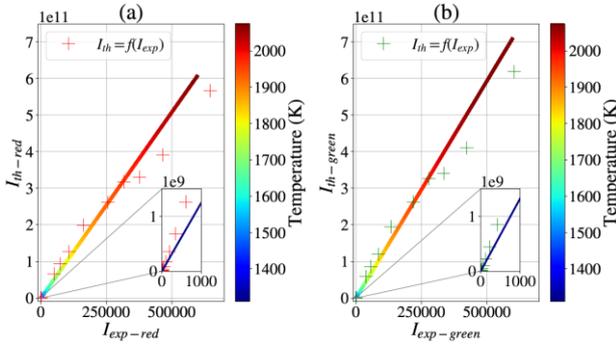


Figure 2 : Intensités théoriques en fonction de l'intensité expérimentale dans (a) le canal rouge et (b) le canal vert.

Il existe une relation linéaire entre ces deux grandeurs :

$$I_{exp-canal} = I_{th-canal} \times \alpha_{canal},$$

Qui est représentée sur la Figure 2 par la droite multicolore où l'échelle de couleur est fonction de la température. Le coefficient  $\alpha$  dépend de la configuration de la caméra (selon l'objectif qui est monté dessus, sa distance focale et son ouverture).

Aussi, comme l'expression de l'intensité théorique en fonction de la température est connue :  $I_{th-canal} = f(T_{canal})$  (Figure 2), il est possible d'exprimer la température de couleur  $T_{canal}$  en fonction de l'intensité expérimentale :

$$T_{canal} = f^{-1}\left(\frac{I_{exp-canal}}{\alpha_{canal}}\right). \quad (4)$$

En connaissant les températures  $T_{rouge}$  et  $T_{vert}$ , il est possible de calculer les luminances  $L^0(\lambda_{rouge}, T_{rouge})$  et  $L^0(\lambda_{vert}, T_{vert})$  en choisissant un couple de longueurs d'ondes initiales ( $\lambda_{rouge}^0 = 650 \text{ nm}$  et  $\lambda_{vert}^0 = 450 \text{ nm}$ ). Le choix de ces longueurs d'ondes initiales est arbitraire et conditionne le reste de la calibration. Les dernières inconnues de l'équation (3) sont les longueurs d'onde équivalentes  $\lambda^{eq}$ . À l'inverse d'un pyromètre, cette caméra intègre le signal lumineux sur une bande spectrale, et le chemin optique des objectifs qui sont montés dessus est

inconnu. Ainsi l'optimisation de ces longueurs d'onde permet de réduire les erreurs liées à ces incertitudes.

$$T_s = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_{vert}^{eq}} - \frac{1}{\lambda_{rouge}^{eq}} \right)}{5 \ln \left( \frac{\lambda_{rouge}^{eq}}{\lambda_{vert}^{eq}} \right) + \ln \left( \frac{L^0(\lambda_{rouge}^0, T_{rouge})}{L^0(\lambda_{vert}^0, T_{vert})} \right)} \quad (5)$$

L'estimation de  $\lambda_{rouge}^{eq}$  et  $\lambda_{vert}^{eq}$  est faite en minimisant l'écart entre la température calculée via la caméra, et la température réelle des dispositifs de calibration. Pour la configuration utilisée en FPDFL,  $\lambda_{rouge}^{eq} = 652 \text{ nm}$  et  $\lambda_{vert}^{eq} = 451,1 \text{ nm}$ .

### 2.4. Multi-temps d'exposition

Chaque image de la caméra est composée de pixels encodés sur 8 bits et pouvant prendre une valeur entre 0 et 255. Une zone surexposée correspond à une zone où le capteur est saturé, et la valeur des pixels est proche de 255. Au contraire, quand les valeurs des pixels tendent vers 0, la zone est dite sous-exposée. Pour observer en détail les procédés de fabrication additive, la méthode HDR (*High Dynamic Range*) consiste à prendre plusieurs images d'une même scène à différents temps d'expositions [19]. Le temps d'exposition est le paramètre qui permet de contrôler ce phénomène. Quand l'obturateur reste ouvert un temps très court par rapport à la variation de luminosité observée, le nombre de photons transmis est plus faible, ce qui permet d'observer les zones très brillantes en limitant la surexposition.

Cette technique est très efficace pour observer les zones avec de forts gradients de température. Plusieurs images à différents temps d'expositions sont prises successivement à des temps d'intervalles très courts (par rapport à la vitesse à laquelle évolue la température), et une image médiane est reconstruite sans sur/sous-exposition (Figure 3).

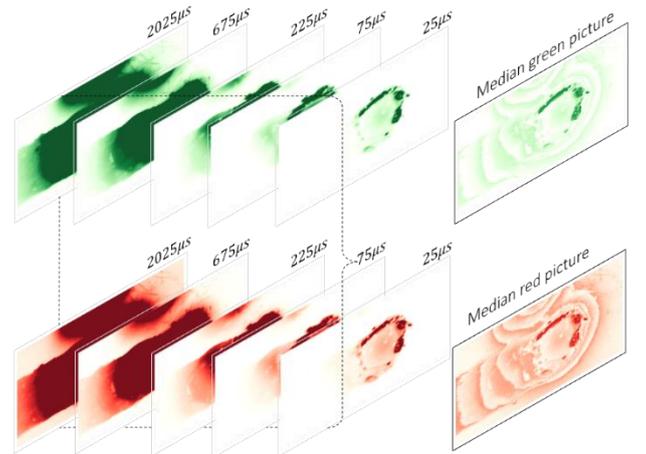


Figure 3 : Image médiane du bain fondu dans les canaux rouges et verts.

Le champ de température est supposé constant pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$  où  $n$  images sont prises. Cet aspect est discuté plus en détail dans la suite de ce document.

### 3. OBSERVATION DU BAIN FONDU

#### 3.1. En fabrication directe par projection laser (poudre)

Le dispositif de mesure RGB présenté dans ce document est très compact et facilement ajustable sur n'importe quel type d'installation. La machine de fabrication directe par projection laser est composée d'un bras robot 6 axes (Staubli RX160) équipé avec :

- Un laser à diode avec une longueur d'onde pouvant varier entre 900 et 1200 nm, et un faisceau de diamètre 1.4 mm.
- Un distributeur de poudre avec 2 compartiments distincts pour pouvoir utiliser différents matériaux.
- Un système d'extraction ATEX pour limiter les résidus de poudre dans la cabine de fabrication.
- Une lentille optique avec une filtre à 660 nm.

La caméra RGB est montée co-axialement au laser, au-dessus de la lentille optique, pour avoir une vue de dessus du bain de fusion (Figure 4).

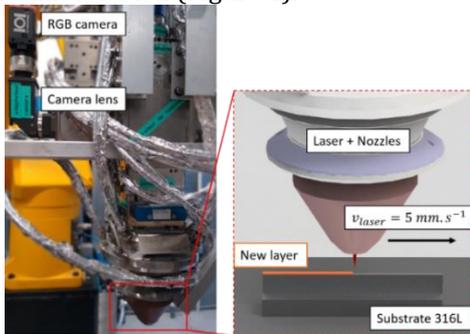


Figure 4 : Dispositif FDPL pour l'observation du bain fondu.

La poudre d'acier inoxydable 316L est déposée sur un substrat en acier inoxydable 316L également. Le débit de gaz, la vitesse et la puissance du laser sont constants au cours de la fabrication ( $Q_{poudre} = 3.4 \text{ g. min}^{-1}$  ;  $P_{laser} = 250 \text{ W}$  ;  $v_{laser} = 5 \text{ mm. s}^{-1}$ ). Pour observer à la fois la zone fondue et la zone solide, on choisit les 7 temps d'expositions suivant : 0.025, 0.050, 0.100, 0.200, 0.500, 1.000 and 2.000 ms, et une série d'images est prise toutes les 160 ms (Figure 5).

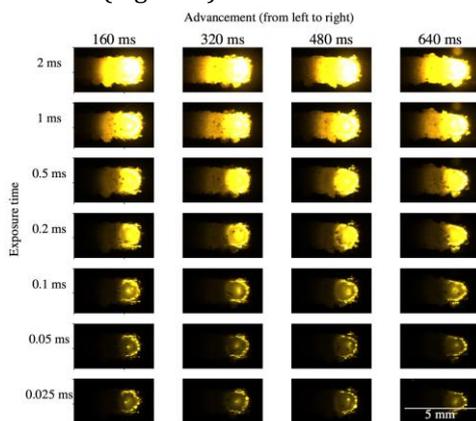


Figure 5 : Images successives du bain fondu avec tous les temps d'expositions.

Chaque colonne correspond à une série d'image prise avec des temps d'expositions différents. Les images de la première ligne sont surexposées au centre (la région la plus chaude), mais elles permettent d'observer la température dans la zone solide (sur le substrat). En combinant les 7 images, on peut étudier à la fois la température de la zone solide et celle de la zone liquide.

Pour ces essais, la vitesse du laser est de  $5 \text{ mm. s}^{-1}$ , et le temps total de la prise des 7 images est de  $\Delta t = 3 \text{ ms}$ . Comme la caméra est fixée sur le laser, le déplacement maximal de la zone observée entre la première et la dernière image est de  $1.5 \mu\text{m}$ , soit environ 1000 fois plus petit que la taille du bain fondu. Dans ces conditions, l'hypothèse de champs de température constant est valable.

La Figure 6 est une image reconstruite en termes d'intensité (dans le canal rouge). Juste à côté, il s'agit de la même image mais en termes de température (b). Globalement, la température augmente lorsque l'intensité augmente. Sur le profil de température, la température de fusion de l'acier inoxydable 316L est tracée en pointillés noirs (1673 K). Cette méthode permet donc de déterminer à la fois la température du bain fondu, et sa forme.

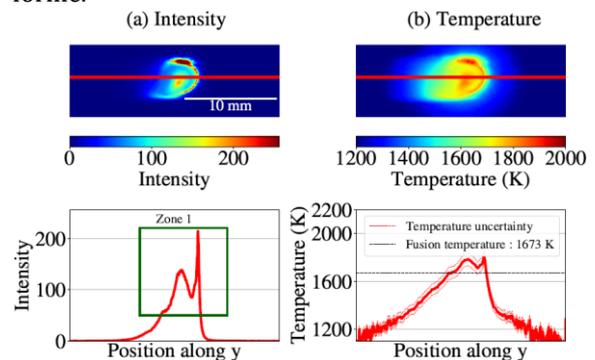


Figure 6 : Evolution de (a) l'intensité et de (b) la température le long du bain fondu.

Sur le graphique de gauche, la zone encadrée est un peu particulière car l'intensité diminue énormément (ce qui se traduit par une diminution de la température calculée). C'est un comportement contre-intuitif car le centre du bain fondu devrait être la zone la plus chaude. Des effets similaires ont été observés avec une caméra infrarouge [20]. Ces effets sont dus à l'oxydation du substrat, autour du bain fondu, et qui résulte en une variation de l'émissivité de la surface observée.

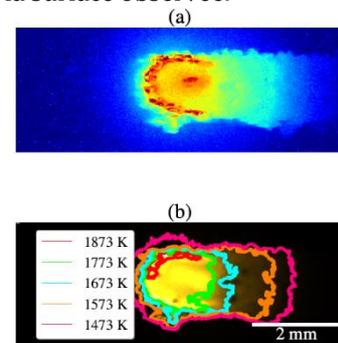


Figure 7 : (a) Cartographie thermique du bain fondu. (b) Isothermes dans et autour du bain.

La Figure 7 montre plusieurs isothermes qui ont été tracés autour de la zone de fusion, à la fois dans la zone liquide et dans la zone solide. Cette cartographie permet de faciliter la visualisation des gradients thermiques.

Finalement, la résolution fine de la caméra permet à la fois d'étudier la température de la surface observée ainsi que les mouvements du bain de fusion pendant la fabrication.

### 3.2. En fabrication additive Arc Fil

La Figure 8 indique l'installation utilisée pour le procédé de fabrication arc-fil. Les paramètres de fabrication sont les suivants :

- Un fil d'acier de diamètre 1.2 mm est utilisé pour l'apport de matière (OK Aristorod 12.50)
- La vitesse d'avance du fil vaut 3500 mm.min<sup>-1</sup>.
- La vitesse de déplacement de la torche est de 400 mm.min<sup>-1</sup>.
- Le gaz de protection est fait d'argon (18%) et de CO<sub>2</sub> (82%) avec un débit de 18 L.min<sup>-1</sup>.

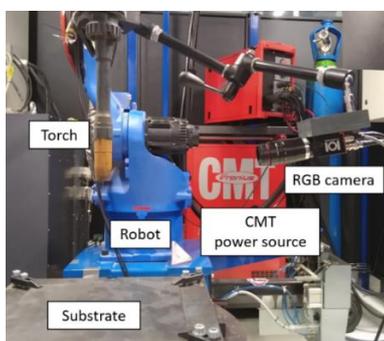


Figure 8 : Dispositif de fabrication additive arc-fil.

La caméra est fixée sur la torche et permet d'observer le profil de la pièce en cours de fabrication. L'acquisition des images est déclenchée entre 2 arcs électriques juste après que le fil soit entré en contact avec le bain de fusion.

De la même façon que pour le procédé FPDFL, on étudie l'évolution de l'intensité et de la température (Figure 9). Dans la zone encadrée, l'intensité atteint la valeur maximale de 255 au niveau de l'endroit où la troche rentre en contact avec le bain. Localement, cette zone est saturée et la température calculée va être sous-estimée car d'après [21], dans ces conditions de pressions particulières, la température de cette zone peut atteindre plusieurs milliers de Kelvin.

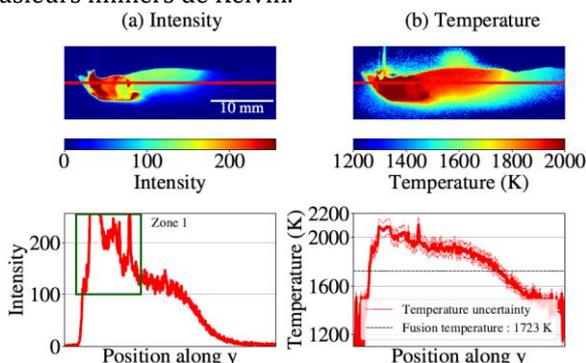


Figure 9 : Evolution de (a) l'intensité et (b) la température le long du bain de fusion lors du procédé arc-fil.

La température de fusion de l'acier de soudure est d'environ 1723 K, et il est encore une fois possible de tracer plusieurs isothermes pour visualiser les gradients de température (Figure 10).

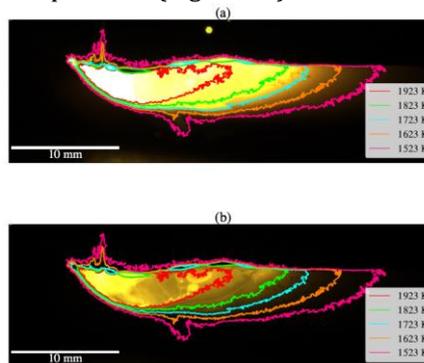


Figure 10 : Isothermes dans et autour du bain de fusion en procédé arc-fil, dessinés sur (a) le plus long temps d'exposition (0.20 ms) et (b) le plus court (0.04 ms).

Les contours sont tracés sur deux images prises successivement à 2 temps d'exposition différents, avec un intervalle de temps de 2 ms entre les 2 acquisitions. Le déplacement maximal de la caméra pendant ce temps-là est de 1.7 μm (environ 1000 fois plus petit que la taille du bain), donc l'hypothèse d'un champ de température constant est valide. Toutefois, on remarque des différences de forme au niveau de la surface, car le bain fondu reste une zone hautement dynamique.

Finalement, ces images montrent les atouts d'une mesure thermique globale puisqu'il est possible d'étudier sur une même image des gradients thermiques dans des zones liquides et solides.

## 4. CONCLUSION

La méthode de mesure de température présentée dans ce papier est un système compact basé sur une caméra RGB avec une réponse spectrale dans le domaine visible. Elle utilise le principe bichromatique pour s'affranchir de l'émissivité des surfaces dans le calcul de la température. L'hypothèse de corps gris qui est faite est valable dans un environnement contrôlé, mais peut introduire des erreurs lorsque des perturbations externes apparaissent sur le champ de vue de la caméra (des oxydes, ou l'orientation de la surface qui varie sur les zones liquides).

Cette caméra a permis d'estimer la température dans des zones liquides et solides sur une plage de température allant de 1000 à 2500 K avec une incertitude relative maximal de 5% sur les mesures réalisées. Elle permet également de suivre l'évolution de la position du front de fusion et de visualiser facilement les gradients thermiques d'une pièce. De plus, sa bonne résolution spatiale permet d'étudier la morphologie des zones observées ce qui en fait un bon atout pour la fabrication additive où le contrôle de la zone fondue est crucial pour assurer une bonne qualité de fabrication.

Des phénomènes très rapides peuvent être étudiés selon le même principe, le facteur limitant est la fréquence d'acquisition de la caméra.

## RÉFÉRENCES

1. Frazier, W. E. Metal additive manufacturing: A review. *J. Mater. Eng. Perform.* **23**, 1917–1928 (2014).
2. Svetlizky, D. *et al.* Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Mater. Today* **49**, 271–295 (2021).
3. Wu, B. *et al.* A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *J. Manuf. Process.* **35**, 127–139 (2018).
4. Lewandowski, J. J. & Seifi, M. Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties. *Annu. Rev. Mater. Res.* **46**, 151–186 (2016).
5. Scime, L. & Beuth, J. Using machine learning to identify in-situ melt pool signatures indicative of flaw formation in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Addit. Manuf.* **25**, 151–165 (2019).
6. Jailin, T. *et al.* Measuring both thermal and kinematic full-fields using a single CMOS camera during high temperature tests. *Opt. Lasers Eng.* **158**, 107107 (2022).
7. Gould, B. *et al.* In Situ Analysis of Laser Powder Bed Fusion Using Simultaneous High-Speed Infrared and X-ray Imaging. *Jom* **73**, 201–211 (2021).
8. Sun, Z., Guo, W. & Li, L. In-process measurement of melt pool cross-sectional geometry and grain orientation in a laser directed energy deposition additive manufacturing process. *Opt. Laser Technol.* **129**, 106280 (2020).
9. Gibson, B. T. *et al.* Melt pool size control through multiple closed-loop modalities in laser-wire directed energy deposition of Ti-6Al-4V. *Addit. Manuf.* **32**, 100993 (2020).
10. Liu, S., Farahmand, P. & Kovacevic, R. Optical monitoring of high power direct diode laser cladding. *Opt. Laser Technol.* **64**, 363–376 (2014).
11. Yamazaki, K. *et al.* Measurement of surface temperature of weld pools by infrared two colour pyrometry. *Sci. Technol. Weld. Join.* **15**, 40–47 (2010).
12. Rotrou, Y., Sentenac, T., Le Maout, Y., Magnan, P. & Farré, J. Near infrared thermography with silicon FPA - comparison to MWIR and LWIR thermography. *Quant. Infrared Thermogr. J.* **3**, 93–115 (2006).
13. Schöpp, H. *et al.* Temperature and emissivity determination of liquid steel S235. *J. Phys. D. Appl. Phys.* **45**, (2012).
14. Kozakov, R. *et al.* Weld pool temperatures of steel S235 while applying a controlled short-circuit gas metal arc welding process and various shielding gases. *J. Phys. D. Appl. Phys.* **46**, (2013).
15. Khan, M. A., Allemand, C. & Eagar, T. W. Noncontact temperature measurement. I. Interpolation based techniques. *Rev. Sci. Instrum.* **62**, 392–402 (1991).
16. Duvaut, T. Comparison between multiwavelength infrared and visible pyrometry: Application to metals. *Infrared Phys. Technol.* **51**, 292–299 (2008).
17. Monier, R., Thumerel, F., Chapuis, J., Soulié, F. & Bordreuil, C. Liquid metals surface temperature fields measurements with a two-colour pyrometer. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* **101**, 72–80 (2017).
18. Chaitanya Krishna Prasad Vallabh, X. Z. Single-camera Two-wavelength imaging pyrometry for melt pool temperature measurement and monitoring in laser powder bed fusion based additive manufacturing.
19. Konstantinides, K., Su, G. M. & Gadgil, N. High dynamic range video coding. *Handb. Signal Process. Syst.* 165–191 (2018) doi:10.1007/978-3-319-91734-4\_5.
20. Shi, D. *et al.* Modeling the effect of surface oxidation on the normal spectral emissivity of steel 316L at 1.5  $\mu\text{m}$  over the temperatures ranging from 800 to 1100 K in air. *Infrared Phys. Technol.* **101**, 699–706 (2016).
21. Morville, S., Carin, M., Carron, D. & Masson, P. Le. 2D axial-symmetric model for fluid flow and heat transfer in the melting and resolidification of a vertical cylinder. *Eur. Comsol Conf.* 13 (2010).
22. Smurov, I., Doubenskaia, M. & Zaitsev, A. Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation. *Surf. Coatings Technol.* **220**, 112–121 (2013).
23. Cadiou, S., Courtois, M., Carin, M., Berckmans, W. & Le masson, P. 3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam). *Addit. Manuf.* **36**, 101541 (2020).

# 3D residual stress modeling in turning of AISI 4140 steel

Sangil Han <sup>a,\*</sup>, Mehmet Cici <sup>a</sup>, Hervé Pascal <sup>a</sup>, Frédéric Valiorgue <sup>a</sup>, Joël Rech <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ecole Centrale de Lyon - ENISE, LTDS, UMR CNRS 5513,  
58 Rue Jean Parot, 42023 Saint-Étienne, France

\* e-mail : sangil.han@enise.fr

## ABSTRACT

This study presents 3D residual stress modeling in turning of AISI 4140 steel. To realize this work, recently developed server based software, MISULAB was employed. Simple axial turning tests and residual stress measurement of the turned surface were conducted to calibrate and validate the model. The results shows an accurate prediction of residual stress gradients in the workpiece surface induced by axial turning of AISI 4140 steel.



# Une nouvelle méthode pour dépoudrer des pièces issues du procédé de fusion par faisceau d'électrons.

P-T. Doutré<sup>a</sup>, C. Grandvallet<sup>a</sup>, M. Museau<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, Grenoble, F-38000, France.

\* e-mail : Pierre-thomas.doutré@grenoble-inp.fr

## 1. INTRODUCTION, ETAT DE L'ART ET OBJECTIF

### 1.1. Introduction : à propos de la technologie de fabrication EBM (Electron Beam Melting)

La fusion sur lit de poudre (ou PBF Powder Bed Fusion) est un procédé de fabrication additive relativement récent qui comprend le frittage laser direct de métal (ou DMLS Direct Metal Laser Sintering), la fusion par faisceau d'électrons (ou EBM Electron Beam Melting), la fusion laser (ou SLM Selective Laser Melting) et le frittage sélectif par laser (ou SLS Selective Laser Sintering). Ces technologies permettent de réaliser des pièces de forme complexe répondant à des spécifications précises [1]. Elles repoussent ainsi les frontières de la conception de pièces en permettant la réalisation des meilleures formes possibles [2-5]. Cependant, ces technologies peuvent être différentes en termes d'étapes de fabrication. Par exemple, la technologie EBM comprend sept étapes, de la conception assistée par ordinateur (CAO) au contrôle de la qualité (Figure 1) [6].

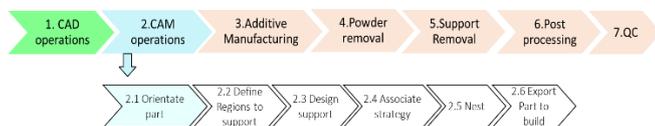


Figure 1 - Etapes du procédé de fabrication EBM

Parmi ces étapes, l'opération de dépoufrage peut être critique, en effet certaines géométries complexes ne peuvent pas être dépoufrées et le temps de dépoufrage sur certaines pièces peut vite devenir important. C'est une opération qui consiste à récupérer la poudre consolidée, aussi appelée "gâteau", dans le but de la recycler et de la réutiliser dans une autre fabrication. L'enlèvement de la poudre suit l'étape de fabrication additive et précède l'enlèvement des supports. Pour de nombreuses raisons, le dépoufrage a un impact important sur la qualité de la pièce, la durée du post-traitement, la santé et la sécurité, l'état de surface de la pièce... Lors de cette étape de

dépoufrage, les pièces sont préalablement piégées dans le gâteau de poudre de titane consolidé et doivent être retirées. Pour réaliser cette opération, un système d'enlèvement de poudre (ou PRS Powder Recovery System) est utilisé [7] et consiste à projeter sur le gâteau de la poudre de titane sous une pression d'air de 5 bars. La poudre est ensuite tamisée afin d'être réutilisée. Sur la base de ces observations, le taux de réussite du dépoufrage par PRS est variable en fonction des caractéristiques ou spécificités des pièces. Par exemple, certaines formes comme des surfaces internes complexes ou des trous (trous borgnes ou trous traversants) restent difficiles à dépoufrer.



Figure 2 - Volume de poudre consolidée à dépoufrer

### 1.2. Etat de l'art

Aujourd'hui, peu d'études sur le dépoufrage sont disponibles pour les technologies PBF. Parmi ces dernières, le procédé EBM est le seul à devoir inclure l'étape spécifique de dépoufrage dans son processus de fabrication. En effet, les procédés DMLS, SHS, SLM et SLS ne rencontrent pas ce problème puisque, lors de la fabrication additive, la poudre n'est pas consolidée. En ce qui concerne la technologie EBM, le moyen conventionnel d'élimination de la poudre est jusqu'à maintenant le PRS [7]. Des travaux de recherche ont

été menés par Vayre [8] et permettent de prédire la capacité des moyens de dépoufrage. Vayre propose une hauteur moyenne de dépoufrage en fonction du diamètre d'un cylindre contenant de la poudre consolidée. Sa proposition a conduit à un rapport "hauteur dépoufrable"/diamètre de 2 à 3 en utilisant uniquement le PRS(Figure 3).

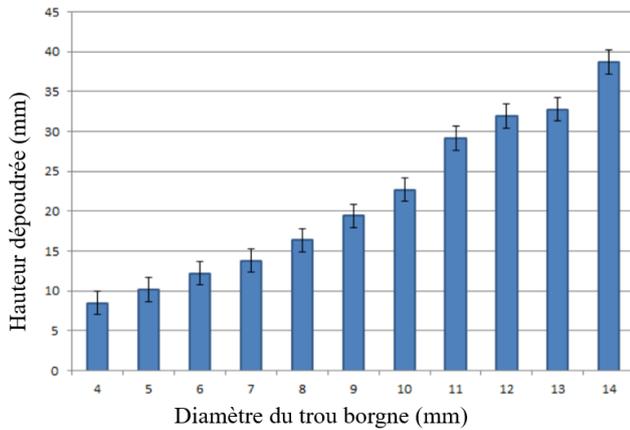


Figure 3 - Hauteur moyenne dépoufrable en fonction du diamètre du cylindre [8]

D'autres recherches récentes ont également été menées par Carre et al. [9] ; elles prédisent la capacité de dépoufrage des structures en treillis en fonction du diamètre hydraulique. Toutes ces approches caractérisent la capacité de dépoufrage par la mise en œuvre d'un PRS [7], mais peu de choses sont décrites sur les autres approches de travail. Lopes et al. [10] fournissent un état de l'art des différents moyens de dépoufrage pour la technologie EBM. Ces auteurs ont réalisé une première opération de dépoufrage grâce au PRS et ont réussi à retirer environ 3 grammes sur 6 de poudre consolidée. Pour ce faire, ils ont appliqué six méthodes de dépoufrage pour éliminer la poudre restante. Les meilleurs résultats ont permis d'éliminer un maximum de 0,17 gramme supplémentaire de poudre. Différents diamètres et formes ont été étudiés (Figure 4).

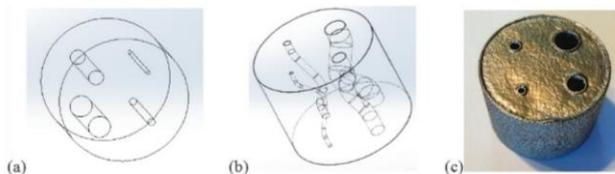


Figure 4 - (a) CAO comportant des canaux droits, (b) CAO comportant des canaux courbes, (c) pièce fabriquée par fabrication additive [10]

Les mêmes auteurs montrent que les solutions efficaces sont à base de liquide. Cependant, de tels milieux ne permettent pas le recyclage de la poudre comme mentionnée dans la section 1.1. De plus, ils soulignent que des expérimentations supplémentaires sont nécessaires pour étudier les capacités de dépoufrage de cavités

internes. Sur la base de cette revue de littérature, il semble nécessaire de concevoir et de développer un système à base non liquide pour éliminer la poudre restante. Ce système devrait ainsi être au moins plus efficace que le PRS utilisé seul ou compléter le PRS.

### 1.3. Objectif et question de recherche

Cet article a pour but de proposer une méthode permettant de dépoufrer des géométries de pièces internes plus efficacement qu'avec le PRS uniquement. En effet, il est actuellement facile de dépoufrer des surfaces externes avec le PRS, ce qui n'est pas le cas pour les surfaces internes telles que les trous. L'étude cherche à analyser le dépoufrage de différentes profondeurs de trous de pièces afin de surmonter les limites actuelles du processus de dépoufrage des pièces par EBM. En outre, cette recherche prend en considération la poudre de titane comme matériau, c'est-à-dire l'alliage Ti-6Al-4V. Compte tenu des contraintes détaillées précédemment (utilisation d'un dispositif à base non liquide), la question de recherche est donc la suivante: comment améliorer le processus de dépoufrage des pièces EBM et comment caractériser les nouvelles performances ainsi obtenues ?

## 2. CONTEXTE ET DEMARCHE

### 2.1. Contexte

Après la fabrication EBM et le dépoufrage de pièces, il est généralement nécessaire d'effectuer des opérations de post-traitement pour améliorer les états de surface. Comme procédé de finition, une installation de grenailage par ultrasons (ou USP Ultrasonic Shot Peening) (Fig. 5) améliore fortement l'état de surface des pièces EBM [11].

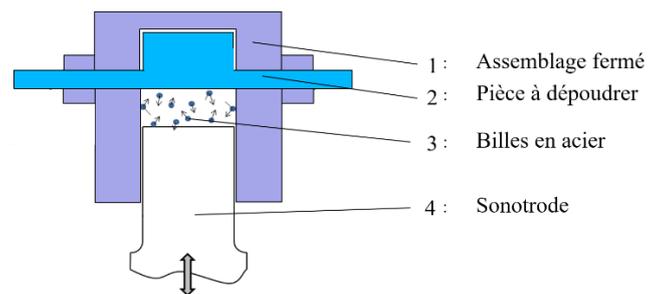


Figure 5 - l'installation de grenailage par ultrasons.

Au cours des travaux de recherche liés à ce processus de finition, il a été observé qu'une certaine quantité de poudre s'échappent des pièces qui n'ont pas été préalablement dépoufrées correctement (Figure 6). Cela conduit à la conclusion que l'USP pourrait contribuer à compléter le processus de dépoufrage initié par le PRS, d'où le sujet de ce travail de recherche.

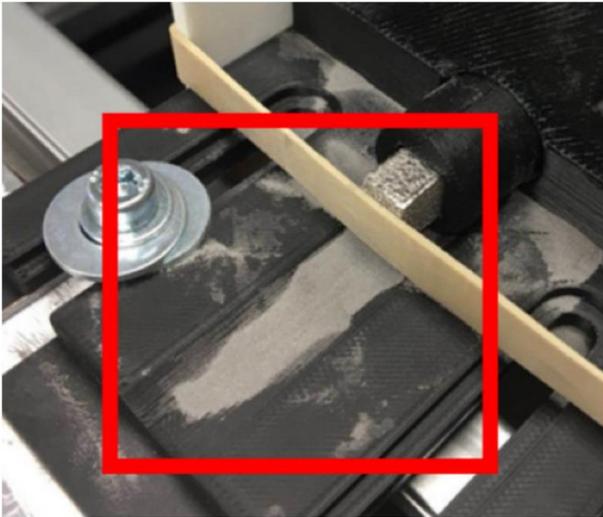


Figure 6 - Poudre s'échappant du dispositif de grenailage par ultrasons.

## 2.2. Description du dispositif USP

La pièce soumise au grenailage (2) est maintenue par l'ensemble fermé (1) qui empêche les billes d'acier (3) de s'échapper. La sonotrode (4) vibre dans le domaine des ultrasons, 20085 Hz, fréquence par défaut de l'installation de grenailage. Cela permet de mettre en mouvement les billes d'acier et de grenailer l'ensemble de la pièce (2). La projection de la bille sur les surfaces de la pièce avec de la poudre consolidée permet d'enlever la poudre restante. Cependant, ce dispositif ne peut être utilisé tel quel car il n'est pas assez étanche et laisse passer la poudre entre (1) et (2), mais aussi (1) et (4) de l'installation de grenailage (Fig. 5). La poudre de titane étant risquée pour les opérateurs, il est alors nécessaire d'améliorer le système afin d'éviter tout contact avec celle-ci. Un couvercle (5) a été conçu, ainsi qu'un système d'aspiration (6) et un dispositif de récupération de la poudre (7) pour éviter tout risque de projection. La figure 7 présente l'ensemble du dispositif après amélioration. Dans la suite de cet article, ce dispositif sera caractérisé. Pour cela, un protocole expérimental est proposé dans la section suivante (Figure 8).

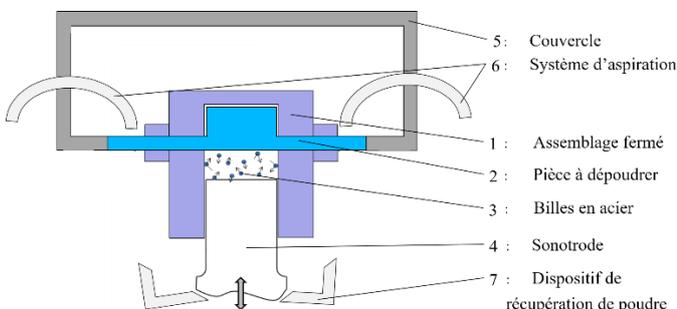


Figure 7 - Ensemble du dispositif expérimental

## 2.3. Approche

L'approche que nous proposons consiste à identifier pour chaque étape du processus de recherche (illustré en Figure 8) les informations permettant d'identifier des paramètres d'évaluations.

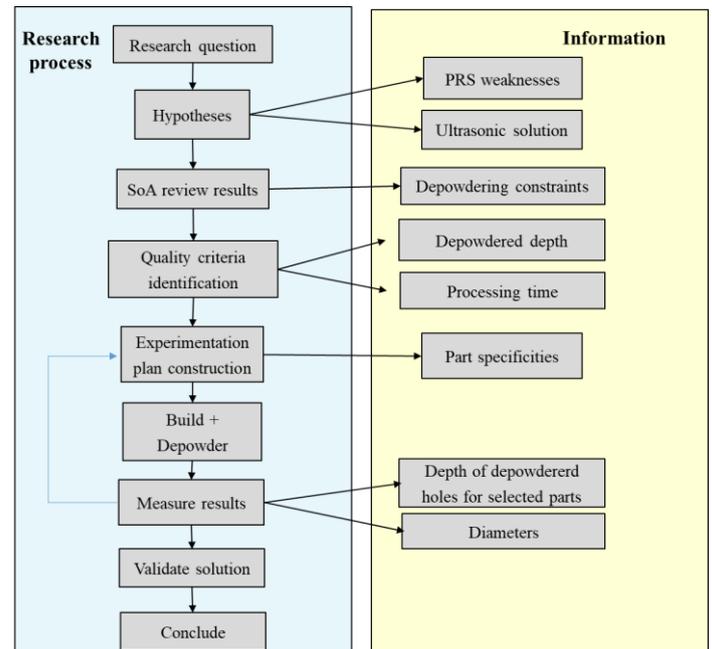


Figure 8 - Méthode de recherche

Après avoir passé en revue l'état de l'art, quelques méthodes de dépowdrage ont montré leurs spécificités et nous ont conduit à lister les critères d'évaluation du dépowdrage, à savoir le rapport "profondeur dépowdrable"/diamètre après dépowdrage ainsi que le temps de traitement. Plusieurs expérimentations sont ainsi préparées afin d'étudier différents types de pièces. Les résultats de dépowdrage complémentaires sont finalement comparés au système PRS classique utilisé seul. La section suivante présente en détail les expérimentations réalisées avec différents échantillons et le système de grenailage par ultrasons, ainsi que leurs résultats.

## 3. ESSAIS ET RESULTATS

Le "gâteau" contenant les échantillons utilisés dans nos différents essais a été dépowdré à l'aide du PRS. Une attention particulière est portée sur les trous des échantillons qui n'ont volontairement pas été dépowdrés. En effet, l'objectif est de caractériser le processus de dépowdrage de l'USP uniquement (sans PRS) pour le dépowdrage des trous.

### 3.1. Essais préliminaires

Afin de valider les performances du système USP pour le dépowdrage des pièces EBM, différents échantillons avec des trous traversants sont conçus (Figure 9).

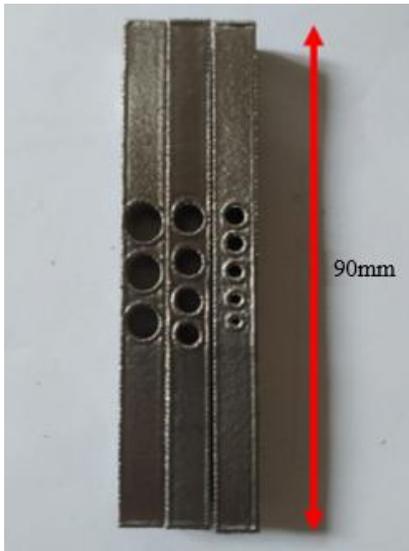


Figure 9 - Échantillons contenant des trous de 1 mm à 6,5 mm de diamètre avec un pas de 0,5 mm.

Les échantillons contiennent des trous d'un diamètre de 1 mm à 6,5 mm avec un pas de 0,5 mm et une profondeur de 7,5 mm. En effet, la largeur maximale de la pièce dans l'installation USP est de 7,5 mm, ce qui nécessite une épaisseur minimale de 0,5 mm de chaque côté des trous. Par conséquent, le diamètre maximal possible des trous est de 6,5 mm. Le but de cette expérience est de vérifier si l'USP est capable d'enlever la poudre consolidée des trous et de déterminer le diamètre minimum des trous qui peuvent être dépoutrés. Les résultats montrent que les trous traversants sont dépoutrés, à l'exception des trous dont le diamètre est compris entre 1 et 2,5 mm ; la raison en est que les diamètres de ces trous sont trop petits pour que les billes de 1 mm puissent s'y loger et enlever la poudre.

### 3.2. Essais finaux

#### 3.2.1 Conception des échantillons et approche expérimentale

Pour caractériser le processus USP, de nouveaux échantillons sont conçus, avec un diamètre minimum de 3 mm, car les plus petits diamètres ne peuvent pas être dépoutrés. La longueur des échantillons est imposée par la taille de la chambre de construction EBM (200x200x180 mm). Ainsi, les échantillons sont conçus avec des trous verticaux, des diamètres de 3mm à 5 mm (échantillon a.) et de 5.5 mm à 6.5 mm (échantillon b.) et une longueur de 180 mm en raison des contraintes d'espace, (Figure 10).

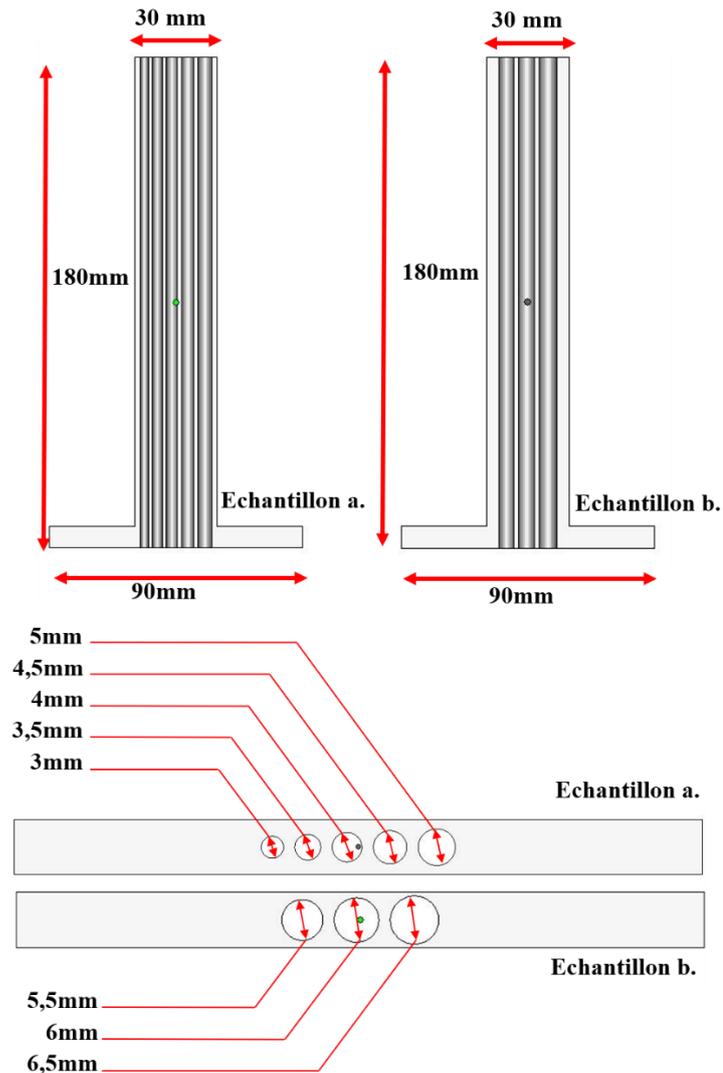


Figure 10 - Échantillons (vue en coupe et vue du dessous)

Tout au long de l'expérience, la profondeur des trous concernés est mesurée avec un calibre toutes les 2 minutes durant l'opération de dépoutrage. A partir du moment où cette profondeur est inférieure à 2 mm, le pas de temps est modifié de 2 à 20 minutes. En effet, les phénomènes de dépoutrage étant logarithmiques, il n'y a plus d'évolution du processus de dépoutrage lorsque la poudre à l'intérieur des trous ne peut plus être enlevée. Pour cette expérimentation, l'opération est arrêtée après 220 minutes.

#### 3.2.2 Résultats expérimentaux

L'évolution de la profondeur de dépoutrage en fonction du temps de dépoutrage est illustrée en Figure 11. Par exemple, il faut 220 minutes pour dépoutré 124 mm sur 180 mm pour un trou de 6 mm de diamètre et pour dépoutré 45 mm pour un trou de 3 mm de diamètre. De plus, nous pouvons observer un impact de la position des trous sur les performances de dépoutrage. En effet, le rapport "profondeur dépoutrable"/diamètre devient plus petit pour les trous qui sont situés aux deux extrémités de l'échantillon.

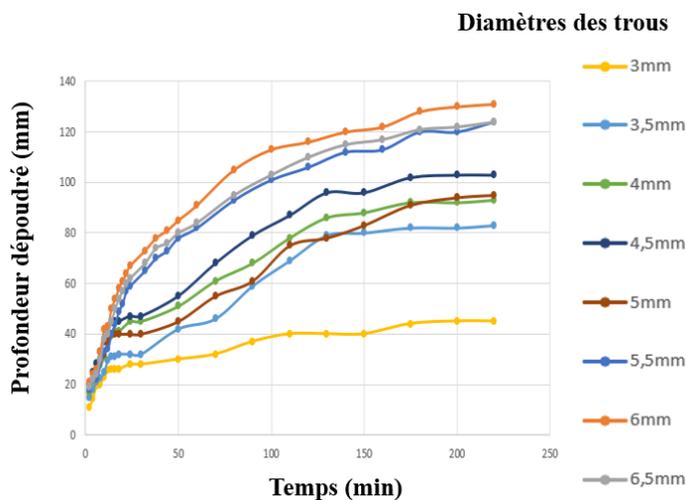


Figure 11 - Trous avec des diamètres allant de 3 à 6.5mm

Cela peut s'expliquer par le fait qu'il y a statistiquement plus de billes qui sont projetées dans les trous proches du centre que dans ceux situés aux extrémités, contribuant ainsi à un meilleur dépoutrage des trous centrés. Dans la Figure 12, la "profondeur maximale de dépoutrage" en fonction de chaque diamètre de trou de nos expériences est représentée. Une régression linéaire est calculée afin de proposer un modèle de prédiction de la "profondeur dépoutrable" des trous droits en fonction de leurs diamètres, et pour des diamètres de trous allant de 3 mm à 6.5 mm.

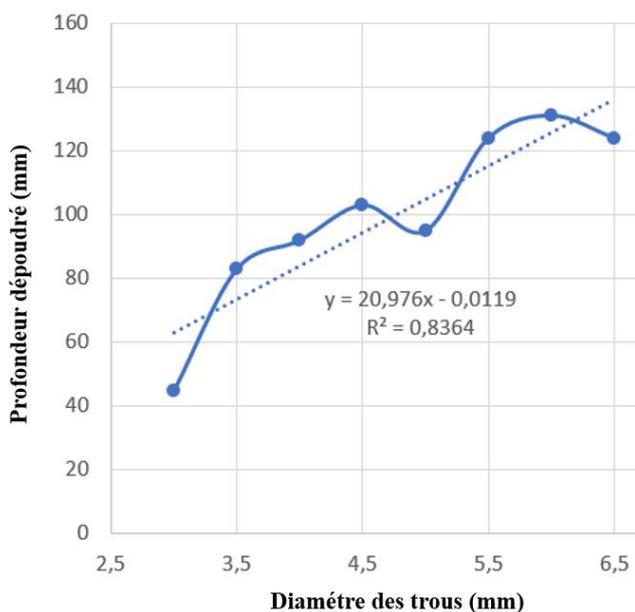


Figure 12 - Profondeur dépoutrée en fonction du diamètre de trous

Cette information pourrait être utilisée lors du processus de conception des pièces EBM afin de s'assurer que les trous des pièces conçues puissent être dépoutrés. La Figure 13 montre la profondeur de dépoutrage en fonction des diamètres des trous. Elle compare les résultats des pièces dépoutrables par PRS [8] avec les pièces dépoutrées par USP. Le rapport "profondeur dépoutrable"/diamètre varie de 2 à 3 pour les pièces

dépoutrées avec le PRS et de 15 à 23 pour les pièces dépoutrées avec l'USP.

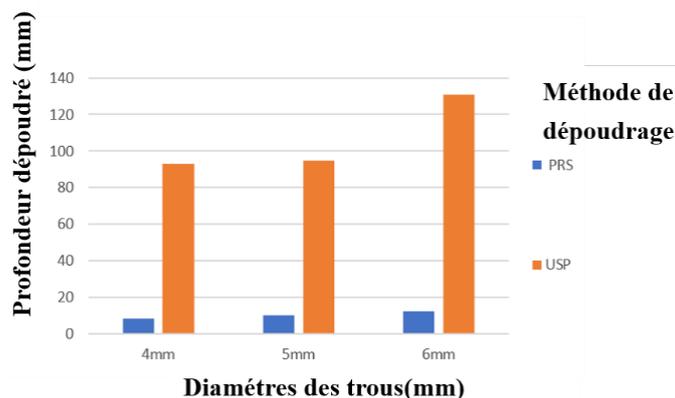


Figure 13 - Comparaison entre les capacités de dépoutrage du PRS et du système USP

## 4. CONCLUSION

### 4.1. Contribution

Cette recherche vise à compléter la méthode utilisant le PRS pour le dépoutrage des pièces EBM. Dans un premier temps, la comparaison des différentes solutions de dépoutrage actuellement proposées dans la littérature scientifique a mis en évidence des faiblesses en termes de dispositif de dépoutrage et d'un manque d'études dans le domaine. En se basant sur l'état de l'art effectué, des critères de dépoutrage ont été mis en avant. Ces critères concernent le ratio de dépoutrage ("profondeur dépoutrable"/diamètre), après PRS et USP, ainsi que le temps de traitement pour le dépoutrage. Les échantillons sélectionnés ont un diamètre de 3 mm à 6,5 mm et une longueur de 180 mm. Après le processus de dépoutrage avec le système à ultrasons, la profondeur de la poudre retirée en fonction du temps de dépoutrage est mesurée. Ces expérimentations nous ont permis de proposer un modèle de prédiction de la profondeur de dépoutrage des trous en fonction de leur diamètre. En conclusion, cette méthodologie peut enrichir les recherches actuelles sur les systèmes de dépoutrage PBF et offre des perspectives pour les recherches futures sur des pièces EBM. Ces essais donnent en effet des résultats prometteurs qui mettent en évidence les principaux atouts de cette nouvelle méthode.

### 4.2. Perspectives

D'un point de vue industriel, l'amélioration du système de dépoutrage de la technologie EBM aura un effet bénéfique important. Par exemple, il pourrait être intéressant de fabriquer des échangeurs de chaleur monoblocs contenant des canaux de refroidissement conformes, ou encore de construire des structures en treillis avec une densité supérieure aux limites mises en évidence par [9]. Pour ce faire, des travaux de recherche supplémentaires seraient nécessaires pour répondre à des besoins tels que la détermination des limites de

dépoudrage pour des pièces de formes internes complexes ou l'extension de la méthode à un dispositif de dépoudrage de plus grandes dimensions. De plus, cette étude a été réalisée en utilisant la fréquence par défaut de l'installation USP. L'étude de la variation de cette fréquence sur les performances de dépoudrage pourrait être étudiée. Enfin, il serait intéressant de tester ce mécanisme de dépoudrage avec des géométries internes plus complexes, par exemple des canaux de refroidissement conformes.

## RÉFÉRENCES

- [1] D. Bourell, J. Beaman, M. Leu, D. Rosen, A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. *Proceedings of RapidTech* 24–25.
- [2] Y. Saadlaoui, J.-L. Milan, J.-M. Rossi, P. Chabrand, Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes, *Journal of Manufacturing Systems*, volume 43, part 1, 2017, pages 178–186 (2017)
- [3] P. Shah, R. Racasan, P. Bills, Comparison of different additive manufacturing methods using computed tomography, *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, Volume 6, Part B, 2016, Pages 69-78, ISSN 2214-6571
- [4] K. Saloniatis, S.A. Zarban, Redesign optimization for manufacturing using additive layer techniques, *Procedia CIRP*, Volume 36, 2015, Pages 193-198, ISSN 2212-8271.
- [5] T. Primo, M. Calabrese, A. Del Prete, A. Anglani, Additive manufacturing integration with topology optimization methodology for innovative product design, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 93, 2017, Pages 467–479.
- [6] C. Grandvallet, M. Mbow, T. Mainwaring, F. Pourroy, F. Vignat et al., Eight action rules for the orientation of additive manufacturing parts in powder bed fusion: an industry practice, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. Volume 14, 2020, pages 1–12.
- [7] Electron Beam Melting Machines | EBM Machines | GE Additive, <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/ebm-machines>
- [8] B. Vayre, Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM, Ph.D. Thesis, Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, France, <http://www.theses.fr/s97575> (2014)
- [9] A. Carré, M. Museau, P.-T. Doutré, F. Vignat, A method to determine the depowdered height in lattices manufactured by electron beam melting, *Journal of Manufacturing Process*. Volume 34, Part A, 2018, Pages 1–6.
- [10] A.J. Lopes, L.C. Ramos, D. Saenz, P. Morton, C.A. Terrazas et al., Analysis of powder removal methods for ebm manufactured ti-6al-4v parts, <http://doi.org/10.26153/tsw/17460>
- [11] T. Persenot, A. Burr, E. Plancher, J.-Y. Buffière, R. Dendievel et al., Effect of ultrasonic shot peening on the surface defects of thin struts built by electron beam melting: Consequences on fatigue resistance, *Additive Manufacturing*, volume 28, 2019, pages 821-830, ISSN 2214-8604.

# Caractérisation d'un poste de soudure Cold Métal Transfer pour le pilotage du procédé Wire Arc Additive Manufacturing

A. Dellarre<sup>(a)</sup>, N. Béraud<sup>(a)</sup>, N. Tardif<sup>(b)</sup>, F. Vignat<sup>(a)</sup>, F. Villeneuve<sup>(a)</sup>, M. Limousin<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP\*, CNRS, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

\*Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

<sup>(b)</sup> Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, Lamcos, UMR5259, 69100, Villeurbanne, France

\* e-mail : anthony.dellarre@grenoble-inp.fr

## 1. INTRODUCTION

Le Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) est une technologie de fabrication additive émergente. Elle permet la production de pièces avec un taux de dépôt de matière relativement élevé, mais avec un état de surface équivalent à un brut de fonderie. Le procédé utilise une torche de soudure montée sur un robot ou une machine tridimensionnelle [1]. Plusieurs technologies de torche existent. Cet article se concentrera sur les torches de type Gas Metal Arc Welding [2] avec la technologie Cold Metal Transfer (CMT – Fronius).

Afin de produire industriellement des pièces fonctionnelles, il est nécessaire de maîtriser l'apparition des défauts tels que la porosité [3], les contraintes résiduelles [4] ou les erreurs dimensionnelles [5], [6]. La littérature montre que l'origine de ces défauts est en grande partie due à une mauvaise gestion de la thermique pendant la fabrication [7]. La maîtrise thermique du procédé est donc un enjeu clef.

Plusieurs stratégies sont possibles pour piloter la température de la pièce pendant la fabrication. L'une d'elles consiste à réaliser des temps de pause pendant la fabrication pour laisser la pièce diffuser le surplus d'énergie [8]. Cette stratégie est efficace, mais limite la productivité de la machine. Une autre solution est d'utiliser des dispositifs de refroidissement externe permettant d'améliorer la dissipation thermique [9]. Ces solutions sont contraignantes, car elles ajoutent des éléments dans l'espace de travail du robot pouvant limiter ses mouvements. Enfin, le poste de soudure peut être piloté afin de moduler l'énergie d'apport de la torche pendant la fabrication [10]. Cette solution a l'avantage de conserver la productivité de la machine sans limiter son

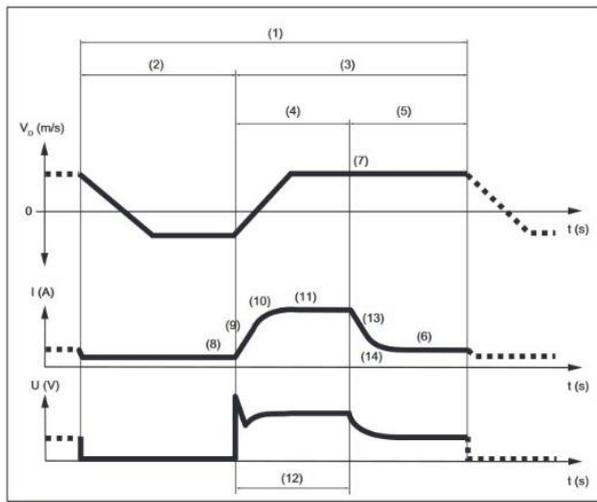
espace de travail. Ce type de pilotage permettrait la mise en place d'un asservissement à l'échelle du cordon de soudure.

Néanmoins, le pilotage d'une torche de soudure de type CMT est complexe. La Figure 1 présente le cycle électrique et le cycle d'apport de matière de la loi de soudure CMT. L'apport de matière et l'apport d'énergie sont fortement couplés nécessitant l'utilisation d'un grand nombre de paramètres [11]. Des connaissances expertes sont nécessaires pour les modifier indépendamment. Ainsi, les constructeurs de tels postes de soudure proposent d'utiliser des lois synergiques. Ces lois sont définies de sorte que l'utilisateur n'ait qu'un seul paramètre à faire varier, appelé paramètre synergique (Figure 2). Ce paramètre est appelé paramètre synergique (S, sans unité), il est disponible dans l'interface Fornius sous le nom « vitesse de dévidage ». D'autres paramètres peuvent être disponibles pour l'utilisateur afin de piloter plus finement la loi synergique (tel que le paramètre utilisateur EP/EN). Les paramètres utilisateurs (S, EP/EN, ...) passeront toujours via la loi synergique qui modifiera globalement les paramètres process (Figure 2).

Parmi les grandeurs physiques influentes sur la qualité de la pièce obtenue, cette étude se focalise sur l'énergie apportée et la quantité de matière apportée. Du fait du pilotage en mode synergique du poste de soudure, il est difficile d'établir un lien entre les paramètres utilisateur et les grandeurs influentes [12].

De plus, le poste de soudure est un système asservi à des phénomènes physiques non contrôlables [14] et non documentés par le constructeur. Cet asservissement est utile pour conserver une soudure stable. Une variation des phénomènes physiques autour de la soudure telle qu'une variation de la température ou de la forme du

substrat va faire réagir le poste pour conserver une stabilité du bain. Ces réactions ne sont pas nécessairement souhaitées dans le cadre de la fabrication additive (Figure 2).



Overview of the CMT characteristic parameters

- (1) CMT cycle time
- (2) Short-circuit phase
- (3) Plasma phase
- (4) Boost phase
- (5) Burn phase

Figure 1 : Paramètres process de la loi de soudure CMT. Neuf paramètres process sont présentés (de 6 à 14). Ces paramètres ne sont pas exhaustifs et ne sont pas tous modifiables par l'utilisateur. [13] Vd : Vitesse de dévidage instantané. I : Intensité, U : tension

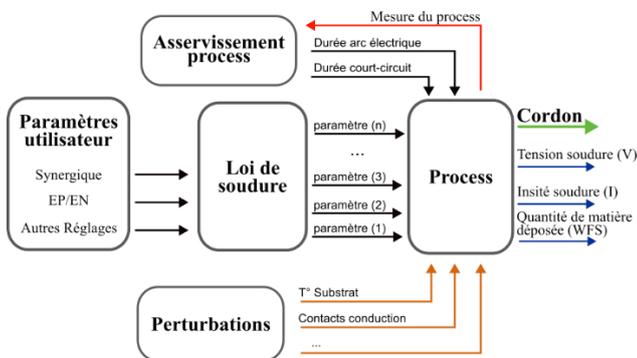


Figure 2: Schémas de fonctionnement du poste de soudure

Cet article propose de caractériser l'influence de paramètres utilisateur d'un poste de soudure (S, EP/EN) sur les grandeurs physiques clés de la fabrication additive (E, WFS) afin de permettre un pilotage découplé de ces deux grandeurs. Pour répondre à cet objectif, un plan d'expériences complet est proposé pour caractériser le comportement du poste de soudure à l'aide de surfaces de réponses. Après avoir détaillé la méthode, les résultats sont présentés. L'établissement des surfaces de réponse et leur analyse sont proposés.

## 2. METHODE

### 2.1. Design de l'expérience

Plusieurs cordons sont fabriqués isolément en suivant un plan d'expériences complet (Figure 3). La loi de soudure utilisée propose un pilotage synergique de l'énergie de soudure à l'aide de deux paramètres utilisateurs : le paramètre synergique (S) qui est le paramètre principal pour piloter la loi de soudure et un paramètre de réglage appelé "balance EP/EN" qui permet de faire varier la quantité d'énergie. Pour reproduire des conditions de soudure différentes, le pilotage de la température initiale du substrat avant fabrication ( $T_{init}$ ) est réalisé à l'aide d'un plateau chauffant. Ainsi, les 3 facteurs du plan d'expériences sont : S, EP/EN et  $T_{init}$  ( $^{\circ}C$ ).

Les réponses de l'expérience sont la vitesse du dévidage moyen du fil durant l'expérience (WFS, cette valeur est proportionnelle à la quantité de matière déposée) et l'énergie volumique moyenne de la torche ( $E_{vol}$ ,  $J/m^3$ ). Celles-ci sont calculées à partir des grandeurs physiques de production (U, I, WFS) qui sont mesurées avec l'instrumentation proposée par le poste de soudure (Figure 2).

Dans cette étude, la forme des cordons n'est pas une réponse étudiée de l'expérience.

Le cordon fabriqué avec les paramètres au centre du plan d'expérience est répété 18 fois afin de tester la répétabilité et la stabilité du poste de soudure.



Figure 3 : Cordons fabriqués isolément sur une plaque substrat

### 2.2. Conditions expérimentales

Le plan d'expériences est réalisé avec un robot 6 axes YASKAWA MA1440 et un poste de soudure FRONIUS TPS CMT 4000 Advance. Un plateau chauffant conçu par le laboratoire est utilisé afin d'imposer la température initiale du substrat. Le substrat est une plaque de 250mm\*250mm\*10mm en AlMg3. Avant chaque fabrication, la température du substrat est contrôlée avec un thermocouple FLUKE-50S avec une précision de  $\pm 10^{\circ}C$ .

Le poste de soudure est piloté en mode synergique par la loi CMT Pulse Advance 1369. Figure 4 illustre les dispositifs expérimentaux du laboratoire.

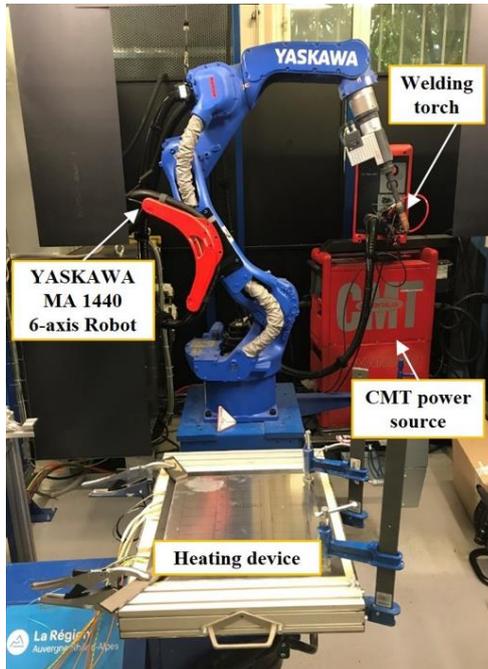


Figure 4 : Robot et plateau chauffant

Un cycle de la loi CMT-PA 1369 correspond à 10 cycles d'une loi CMT suivis de N cycles d'une loi MIG à arc pulsé. Le paramètre utilisateur « balance EP/EN » permet de piloter le nombre N de cycles pulse comme indiqué dans le Tableau 1. La loi CMT étant moins énergétique par rapport à la loi Pulse, cette balance permet de varier fortement l'énergie d'apport de la loi CMT-PA 1369.

Tableau 1 : Balance EP/EN

EP/EN	-2	-1	0	1	2
N	4	7	10	13	16

Les cordons sont fabriqués avec les paramètres de fabrication du Tableau 2. Les facteurs du plan d'expériences sont définis dans le Tableau 3 ce qui représente 120 cordons. 18 cordons supplémentaires sont fabriqués au centre du plan d'expériences avec les facteurs suivants : S = 5,2, EP/EN = 0, Tinit = 125°C. Ils seront appelés cordons de référence.

## 2.1. Instrumentation

L'instrumentation se fait à l'aide du poste de soudure. Le poste permet de mesurer la tension, l'intensité et la vitesse de dévidage moyenne du fil du poste de soudure (WFS). Ces données sont mesurées à 10Hz. Chaque valeur correspond à la moyenne de la grandeur physique dans le laps de temps. Fronius ne communique pas d'information supplémentaire sur l'échantillonnage ou la précision de la mesure.

Tableau 2 : Paramètres de fabrication

Matériau	Loi CMT	Diamètre fil	Longueur cordon	Vitesse robot (TS)	Distance tube contact
4043 - AISi3	CMT-PA 1369	1,2mm	100 mm	60cm/min	15mm

Tableau 3: Facteurs du plan expérience

Paramètre Synergique (S)	EP/EN	Température initiale substrat
4 - 4,5 - 5 - 5,5 - 6 - 6,5	-2 - -1 - 0 - 1 - 2	50°C - 100°C - 150°C - 200°C

## 2.2. Traitement des données

Avec ces données, l'énergie volumique (E\_vol) apportée par la torche peut être calculée :

$$E_{vol} = \frac{U \times I}{WFS \times \frac{\pi \phi_{fil}^2}{4}} \quad (1)$$

Pour avoir une valeur représentative de E\_vol et de WFS par cordon, la valeur moyenne de chaque grandeur par cordon est calculée en excluant les valeurs de la première et dernière seconde. En effet, le poste de soudure a des lois spécifiques pour démarrer et arrêter l'arc qui n'est pas étudié ici.

Pour mieux représenter les variations des facteurs, les données de E\_vol sont normalisées par rapport à la valeur moyenne calculée avec les 18 cordons au centre du plan d'expériences.

## 2.3. Donnée en ligne

Les données générées sont disponibles en ligne [15]. Un fichier CSV comprenant les données d'entrées et de sortie est proposé. Un code python est également proposé pour visualiser les graphiques en 3D.

# 3. RESULTATS

## 3.1. Répétabilité du procédé

Les résultats concernant WFS en fonction des facteurs d'entrée sont présentés à la Figure 5. La valeur moyenne des points de référence pour WFS est de 6,94 m/min, la valeur moyenne des points de référence pour E\_vol est  $9,48 \times 10^9 J/m^3$ .

L'étude de la dispersion des résultats se fait avec l'écart type expérimental à 95% par la loi de Student. L'écart type est égal à 7% pour WFS et égal à 7% pour E\_vol.

## 3.2. Étude de WFS

La valeur de référence est égale à 6,94 m/min. Les résultats sont présentés à la Figure 5. La variation de WFS dans le plan d'expériences par rapport à la valeur de

référence atteint un maximum de +28% (8,55 m/min) et un minimum de -31% (4,62m/min).

Augmenter le EP/EN fait baisser WFS, mais avec une influence d'environ +/- 2.5% à autres facteurs constants.

La variation de température a une faible influence sur la variation de WFS avec une variation moyenne observée inférieure à 1%.

Deux valeurs semblent aberrantes pour une EP/EN = -2, et un WFS de 4,5m/min et 6m/min.

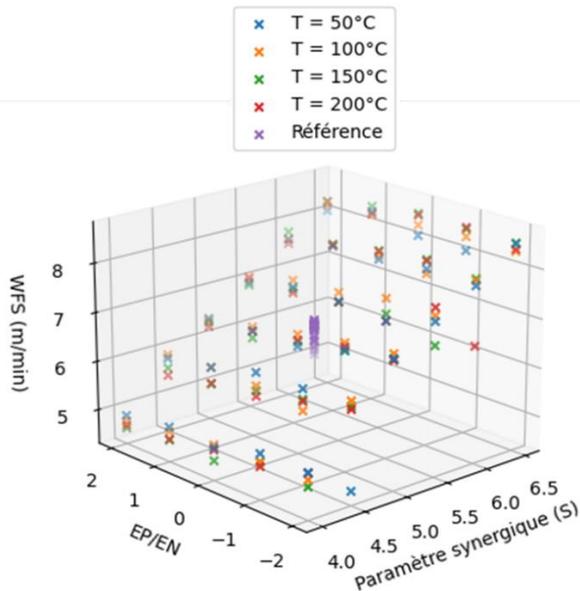


Figure 5 : WFS en fonction des facteurs d'entrée. La valeur de référence est égale à 6,94 m/min.

### 3.3. Étude de E\_vol

Pour comparer la variation de E\_vol en fonction des facteurs, les valeurs sont normalisées par rapport à la valeur moyenne des points de référence. Cette valeur de référence est égale à  $9,48 \times 10^9 J/m^3$ . Les résultats sont présentés à la Figure 6.

La variation de E\_vol dans le plan d'expériences par rapport à la valeur de référence atteint un maximum de +41% ( $13,1.10^9 J/m^3$ ) et un minimum de -28% ( $6,9.10^9 J/m^3$ ).

Le facteur EP/EN permet une variation moyenne sur E\_vol d'environ +/- 18%. Son influence est plus importante pour de faibles S que pour de grands S.

La variation de S a une influence moyenne sur E\_vol de +/-12%. Plus S est grand, plus E\_vol est petit.

Concernant la température du substrat, son influence est variable en fonction des facteurs de fabrication. Cette variation peut-être de +/- 11% pour S = 4 et EP/EN = 2 à négligeable pour S = 6 et EP/EN = -2.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Répétabilité du procédé

L'écart type des résultats pour les cordons de référence à 95% est conséquent. Cette expérience ne permet pas de proposer des causes à ces variations, mais illustre la difficulté d'obtenir des conditions de fabrication initiales répétable. De plus, le fait que le poste de soudure fonctionne comme une boîte noire rend l'analyse de ces variations difficiles. Une hypothèse de l'origine de ces défauts peut être le contact entre la plaque substrat et le plateau chauffant. En effet, si un contact plan-plan est réalisé initialement, les déformations thermiques modifient la nature du contact. Ainsi le transfert thermique et le transfert électrique seraient modifiés. La variation de 7% pour WFS est à prendre en considération pour la suite des résultats. La variation de 7% pour le E\_vol n'est pas surprenante, car cette grandeur est inversement proportionnelle à WFS.

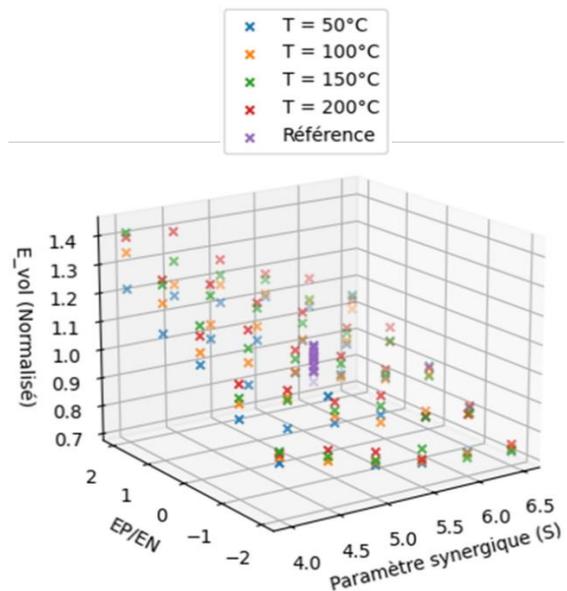


Figure 6: E\_vol en fonction des facteurs. La valeur de référence est égale à  $9,48 \times 10^9 J/m^3$ .

### 4.2. Étude de WFS

À partir de ces données, il est alors possible de proposer une surface de réponse sur ces plages de valeur pour piloter la quantité de matière apportée en fonction des facteurs d'entrées. L'influence de la température peut être négligée. La surface de réponse proposée est un plan associé par la méthode des moindres carrés. L'écart type expérimental à 95% est de 6%. Au vu de la variation du procédé, approximer les réponses du système par un plan pour WFS semble pertinent. L'équation du plan s'écrit :

$$WFS = 1.33 S - 0.104 EP/EN - 0.172 \quad (2).$$

On observe une relation proche de celle de la proportionnalité entre WFS et le paramètre synergique (S). Certainement cela a été voulu par Fronius lors de

l'établissement de la synergie, pour autant le paramètre synergique ne devrait pas être assimilé à une vitesse de dévidage.

### 4.3. Étude de E\_vol

Concernant la variation de E\_vol, les facteurs ont une influence sur le système. Ce nuage de point peut être approximé par 4 plans associés à l'aide du critère des moindres carrés en fonction de la température. Les écarts types des erreurs à 95% pour l'approximation de E\_vol par des plans aux températures de 50°C, 100°C, 150°C et 200°C sont respectivement égaux à 4%, 6%, 6% et 7%. Au vu de la variation du procédé, approximer les réponses du système par un plan pour E\_vol semble pertinent. Les équations des quatre plans de tendance sont :

$$E_{volT_{50}} = 0.183 S - 0.013 EP/EN + 0.059 \quad (3)$$

$$E_{volT_{100}} = 0.193 S - 0.013 EP/EN + 0.012 \quad (4)$$

$$E_{volT_{150}} = 0.212 S - 0.015 EP/EN - 0.098 \quad (5)$$

$$E_{volT_{200}} = 0.207 S - 0.02 EP/EN - 0.069 \quad (6)$$

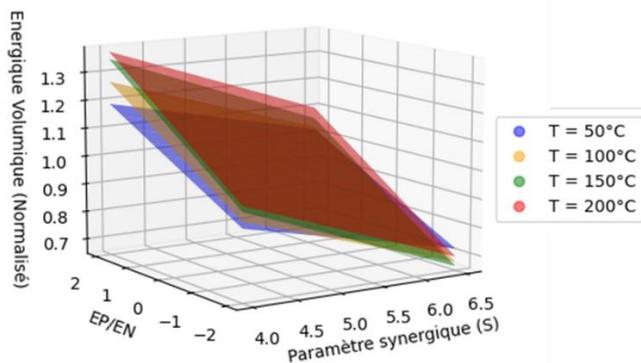


Figure 7 : Approximation de E\_vol par des plans en fonction des facteurs

### 4.4. Proposition de pilotage du poste

Avec ces plans de réponse, le poste de soudure peut être piloté pour faire varier E\_vol sans faire varier WFS. En effet, l'intersection du plan de réponse avec le plan horizontal correspondant au WFS choisi donne alors le couplage de S et EP/EN. Par exemple avec une consigne de WFS = 8m/min, la relation de couplage entre S et EP/EN est égale à :

$$1.33 S - 0.104 EP/EN - 5 = 0 \quad (7)$$

Pour déterminer les variations de E\_vol possibles avec ce couplage, un plan vertical est créé contenant l'ensemble des points vérifiant le couplage entre S et EP/EN. L'intersection de ce plan avec les plans de réponse de E\_vol en fonction de la température indique les variations d'énergie possibles. La Figure 8 définit les E\_vol accessibles pour une température initiale de substrat de 50°C vérifiant le couplage pour maintenir WFS = 8m/min.

La Figure 9 illustre les variations de E\_vol accessibles en fonction du couplage de EP/EN - S permettant d'avoir WFS de 8m/min en fonction de la température.

### 4.5. Les limites

Ce plan d'expériences a été réalisé dans des conditions ne correspondant qu'à la première couche de déposition en fabrication additive. Extrapoler ces résultats pour la réalisation d'une pièce complète n'est pas possible. En effet, lors de l'empilement des couches de fabrication, plusieurs perturbations telles que des températures de substrat beaucoup plus élevées ou des transferts thermiques différents dus à la géométrie doivent être prises en considération.

Néanmoins, il est intéressant de noter que les réponses du poste de soudure pour E\_vol et WFS sont linéaires par rapport aux facteurs S et EP/EN. Ce résultat est prometteur pour pouvoir réaliser de futurs plans d'expérience optimisés pour tester l'influence d'autres perturbations liées à la fabrication additive.

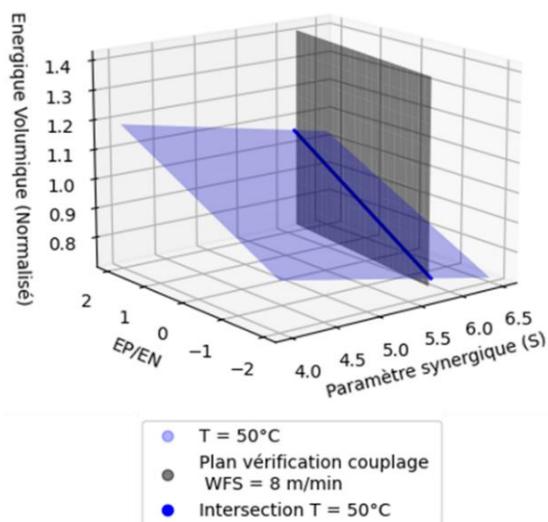


Figure 8 : intersection entre le plan de réponse E\_vol<sub>T50</sub> et le plan vérifiant la consigne de couplage pour WFS = 8m/min

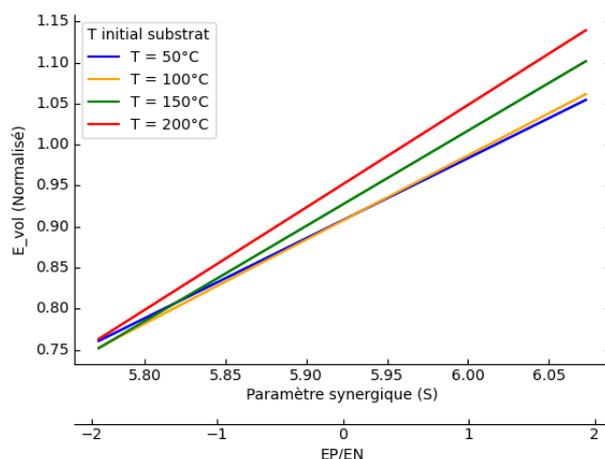


Figure 9 : E\_vol accessible une consigne de WFS = 8m/min

## 5. CONCLUSION

Ce papier propose une caractérisation du poste de soudure FRONIUS TPS CMT 4000 Advance dans des conditions de fabrication spécifiques pour un pilotage indépendant de la quantité de matière et de l'énergie apportée. La littérature montre le besoin de contrôler la thermique et la possibilité de réaliser ce pilotage par le poste de soudure. Cependant, la complexité synergique des lois où l'apport de matière et l'apport d'énergie sont liés rend un découplage problématique. Un plan d'expériences complet est proposé afin de caractériser le poste de soudure. Les résultats montrent une faible répétabilité du processus. Au vu de ces variations, une approximation par des plans de réponse caractérise bien les résultats. Ces résultats sont à considérer dans le contexte du plan d'expériences. Dans ce contexte, le pilotage de  $E_{vol}$  et de WFS peut être dissocié.

De nouvelles expériences peuvent être réalisées pour valider le résultat en appliquant le couplage pour maintenir WFS constant. Des approximations des réponses au procédé par des plans ont été proposées. La prise en compte de plusieurs autres facteurs d'entrée, notamment celle de perturbations caractéristiques de la fabrication additive telle qu'une évolution du substrat, pourrait alors être utilisée pour réaliser un plan d'expériences optimisé pour caractériser la machine. Une calibration avec des expériences spécifiques et optimisées pourrait alors être proposée afin de caractériser le poste de soudure dans un cadre d'utilisation défini pour moduler l'énergie et l'apport de matière de manière indépendante aux perturbations observées.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le stagiaire Geoffrey Melzani pour son aide à la réalisation au plan d'expériences. Remerciement à S.mart Grenoble Alpes pour l'utilisation de la plateforme de prototypage. Remerciement à l'ANR pour le financement inscrit dans le projet METALIC [ANR-21-CE10-0003].

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Xia *et al.*, "A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system," *Journal of Manufacturing Systems*, p. 15, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.008>.
- [2] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, doi: [10.1007/s00170-015-7077-3](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3).
- [3] G. Marinelli, F. Martina, S. Ganguly, and S. Williams, "Development of Wire + Arc Additive Manufacturing for the production of large-scale unalloyed tungsten components," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, doi: [10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009).
- [4] J. Ding *et al.*, "Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts," *Computational Materials Science*, 2011, doi: [10.1016/j.commatsci.2011.06.023](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.06.023).
- [5] V. Laghi, M. Palermo, G. Gasparini, V. Alena Girelli, and T. Trombetti, "Geometrical Characterization of Wire-and-Arc Additive Manufactured Steel Element," *Adv. Mater. Lett.*, doi: [10.5185/amlett.2019.0019](https://doi.org/10.5185/amlett.2019.0019).
- [6] A. S. Yildiz, K. Davut, B. Koc, and O. Yilmaz, "Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics," *Int J Adv Manuf Technol*, 2020, doi: [10.1007/s00170-020-05482-9](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9).
- [7] X. Chen *et al.*, "A review on wire-arc additive manufacturing: typical defects, detection approaches, and multisensor data fusion-based model," *Int J Adv Manuf Technol*, 2021, doi: [10.1007/s00170-021-07807-8](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07807-8).
- [8] F. Monteverchi, G. Venturini, N. Grossi, A. Scippa, and G. Campatelli, "Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique," *Additive Manufacturing*, 2018, doi: [10.1016/j.addma.2018.01.007](https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.007).
- [9] L. J. da Silva, D. M. Souza, D. B. de Araújo, R. P. Reis, and A. Scotti, "Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM," *Int J Adv Manuf Technol*, 2020, doi: [10.1007/s00170-020-05201-4](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4).
- [10] M. A. Chergui, "Simulation Based deposition Strategies Evaluation and Optimization in Wire Arc Additive Manufacturing," 2020, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03273221>
- [11] T. Kumar, D. V. Kiran, N. Arora, and P. S. Kumar, "Study of steel-aluminium joining under the influence of current waveforms using advanced CMT process variants," *Materials and Manufacturing Processes*, 2022, doi: [10.1080/10426914.2022.2030879](https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2030879).
- [12] A. G. Ortega, "Prototypage rapide de pièces en alliage d'aluminium: étude du dépôt de matière et d'énergie lors de la fusion à l'arc d'un fil par le procédé MIG-CMT," Génie civil. Université Montpellier, 2018.
- [13] Fronius, "RCU 500i Operating instructions." Accessed: Mar. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42,0426,0021,EN.pdf>
- [14] P. Kah, R. Suoranta, and J. Martikainen, "Advanced gas metal arc welding processes," *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, doi: [10.1007/s00170-012-4513-5](https://doi.org/10.1007/s00170-012-4513-5).
- [15] A. Dellarre, N. Béraud, N. Tardif, F. Vignat, F. Villeneuve, and M. Limousin, "Caractérisation d'un poste de soudure Cold Métal Transfer pour le pilotage du procédé Wire Arc Additive Manufacturing." Recherche Data Gouv. doi: [10.57745/TOR3SF](https://doi.org/10.57745/TOR3SF), Recherche Data Gouv [dataset], <https://doi.org/10.57745/TOR3SF>

# Approche phénoménologique du contrôle de la géométrie de cordons en WAAM

D. Verbist<sup>a\*</sup>, N. Beraud<sup>a</sup>, M. Museau<sup>a</sup>, F. Vignat<sup>a</sup>, S. Lavernhe<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP

<sup>b</sup> Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190, Gif-sur-Yvette, France

\* E-mail : [diego.verbist@grenoble-inp.fr](mailto:diego.verbist@grenoble-inp.fr)

## 1. INTRODUCTION

Parmi les techniques de Fabrication Additive métallique, la fabrication par Arc-Fil (WAAM en anglais) offre divers avantages, notamment un dépôt de matière à fort débit ainsi que la possibilité de travailler dans un volume de dimensions importantes. Cette technologie est donc particulièrement adaptée à la fabrication de grandes pièces.

La technologie WAAM se base en partie sur le procédé de soudage, où un fil métallique est dévidé par l'intermédiaire d'une torche à une vitesse contrôlée, nommée WFS (Wire Feed Speed). Cette torche est alors déplacée par rapport à la pièce à une vitesse nommée TS (Torch Speed) pour étendre le dépôt de matière sur un substrat, habituellement une plaque, ou une pièce existante. Le rapport WFS/TS qualifie la quantité de matière déposée par unité de longueur de cordon. La contribution de celui-ci dans le contrôle de la géométrie du cordon a été qualifiée comme majeure dans la littérature [1, 2].

Une des variantes du procédé WAAM, est l'utilisation du mode Cold Metal Transfer (CMT), un mode de soudage développé par Fronius et qui apporte un pilotage spécifique du cycle d'apport d'énergie et de matière, c'est-à-dire du déclenchement de l'arc, couplé à une oscillation fil. Les caractéristiques de ce mode CMT sont :

- un mouvement d'aller-retour du fil, qui plongeant dans le bain de fusion crée un court-circuit, puis remontant en établissant un arc électrique de courte durée afin de faire fondre localement le fil ainsi déposer une goutte de métal. Le WFS instantané peut alors être positif ou négatif, nous considérons alors une valeur moyenne du WFS pour qualifier le dépôt ;

- une plus faible accumulation de chaleur en comparaison avec la soudure conventionnelle MIG/MAG du fait d'un apport énergétique plus faible.

Un autre contributeur majeur est la température de dépôt de matière  $T_{dep}$  [3]. Cette température est définie dans la littérature [3, 4] comme la température au point de dépôt de matière, où se situe le bain de fusion, tout au cours du processus. Dans leurs modèles physiques respectifs, Rouchon [5] et Mohebbi [6] montrent que la température de dépôt influence la tension superficielle du bain de fusion, ce qui conditionne la façon dont le matériau se dépose sur le substrat, donnant ainsi lieu à des géométries de cordon différentes.

$T_{dep}$  n'est pas un paramètre directement pilotable, nous sommes donc contraints de le contrôler indirectement à travers d'autres paramètres, à savoir : le mode de parcours de la trajectoire, la géométrie et dimensions du substrat, le rapport WFS/TS, les caractéristiques de l'arc, entre autres.

Le grand nombre des paramètres ayant une influence sur  $T_{dep}$  rend difficile la maîtrise de celui-ci. Diverses méthodes de contrôle de température ont été explorées dans la littérature.

Scotti [7] étudie le contrôle de température à travers des systèmes de refroidissement actif par semi immersion de façon à mieux évacuer la chaleur et maintenir des conditions thermiques de dépôt plus constantes sur différentes couches. Manokruang [4] propose de contrôler cette température de dépôt par la préchauffe du substrat à une température initiale nommée  $T_{init}$  et un temps d'attente entre couches. Cette approche permet d'améliorer la mouillabilité des premières couches ainsi que de réduire le différentiel de température entre les premières couches et les couches supérieures.

Le contrôle des paramètres du procédé est notamment important dans le cas d'utilisation d'alliages d'aluminium [8]. Ce matériau possède un coefficient de dilatation thermique relativement élevé, ce qui le rend plus sensible aux variations de température de dépôt entre différentes couches pouvant engendrer des contraintes résiduelles élevées et des déformations macroscopiques associées. De plus, le coefficient de conductivité thermique particulièrement élevé de ce matériau influence fortement le comportement thermique du procédé et la forme des cordons lors de la solidification.

Les travaux précédents menés au laboratoire G-SCOP ont permis de recenser les paramètres physiques ayant une influence prépondérante sur la géométrie de cordons. Une certaine base de connaissance a été établie afin de construire un modèle phénoménologique Manokruang [4]. Les travaux actuels ont pour objectif de contrôler la géométrie des pièces fabriquées, donc des cordons suivant différentes situations géométriques et conditions thermiques. Les travaux présentés dans cet article visent d'une part à étendre le modèle phénoménologique reliant les dimensions géométriques des cordons, les paramètres opératoires et les états thermiques. D'autre part, inversement aux modèles de la littérature qui définissent la géométrie des cordons en fonction des paramètres physiques et opératoires, nous cherchons à pouvoir déterminer des paramètres opératoires garantissant ou s'approchant d'une géométrie ciblée pour obtenir les dimensions souhaitées.

Cet article décrit dans un premier temps la conception des expériences réalisées sur la cellule WAAM, puis l'extraction des données géométriques, la simulation de l'état thermique du procédé et finalement le traitement de ces données pour une représentation nous permettant de créer le modèle visé.

## 2. METHODE

Nous définissons les expériences à réaliser sur une base de données existantes au laboratoire et initiée par Manokruang [4]. Les essais de dépôt de cordon avec différents paramètres investiguent notamment différentes valeurs de rapport WFS/TS.

Le matériel utilisé pour réaliser les essais consiste en une cellule WAAM détaillée en Figure 1, composée robot YASKAWA MA1440 six axes, d'un poste de soudure TPS CMT 4000 de Fronius et d'un plateau chauffant.

### 2.1. Dépôt de cordons

Le but dans un premier temps est d'étudier le dépôt des éléments les plus simples réalisables par ce procédé : des mono-cordons rectilignes.

Pour ceci la démarche commence par un dépôt de cordons sur un substrat de type plaque plane. L'étude se centre notamment sur la variation de la géométrie du cordon en testant les différentes combinaisons de TS et  $T_{init}$ .

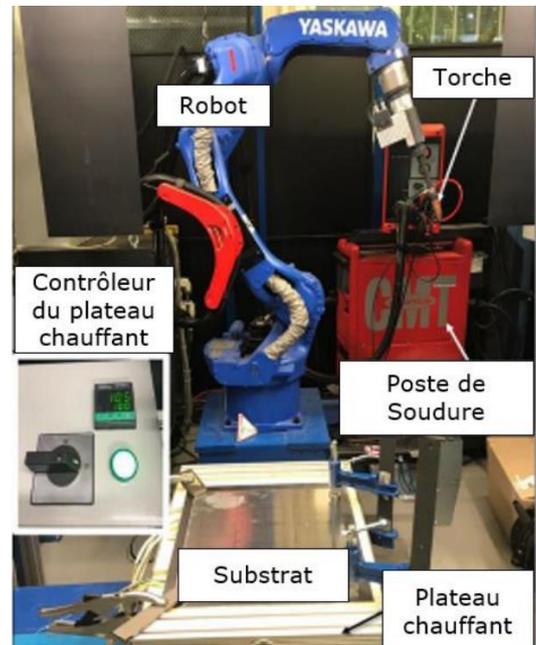


Figure 1 - Détail de la cellule WAAM utilisée [4]

Tableau 1 - Paramétrie pour les essais

Paramètres	Valeur	Unité
<b>Matériaux :</b>		
Fil Electrode	Al 5056	
Substrat	Al 5083	
<b>Dimensions :</b>		
Diamètre du fil	1,2	mm
Plaque substrat	250 x 250 x 5	mm
Longueur des cordons	100	mm
<b>Paramètres de soudage :</b>		
Loi de synergie	CMT 875	
Vitesse d'apport du Fil (WFS)	5	m/min
Vitesse de la Torche (TS)	30, 45, 60, 75, 90	cm/min
Distance tube contact-substrat	15	mm
Débit d'Argon	13	L/min
<b>Paramètres Thermiques :</b>		
Température de préchauffe du substrat ( $T_{init}$ )	25, 100, 200, 300, 400	°C

La plaque substrat est serrée sur le plateau chauffant, et chauffée par celui-ci à la température consigne  $T_{init}$ . Pour chaque valeur de  $T_{init}$  sont réalisés des cordons avec différents TS constituant ainsi un plan complet. Un temps d'attente suffisant est effectué entre chaque fabrication de cordon pour respecter l'homogénéisation de la température dans le substrat.

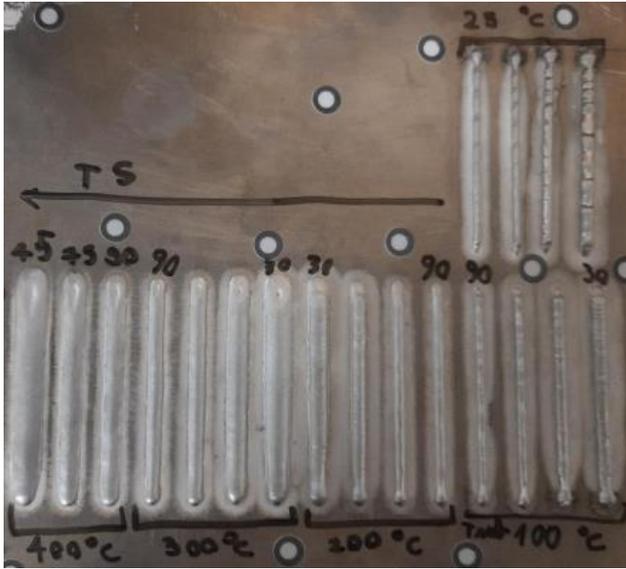


Figure 2 - Cordons déposés sur la plaque substrat

## 2.2. Caractérisation des dimensions des cordons

À la suite du dépôt des cordons, leur géométrie est numérisée à l'aide d'un scanner 3D Handyscan 700.

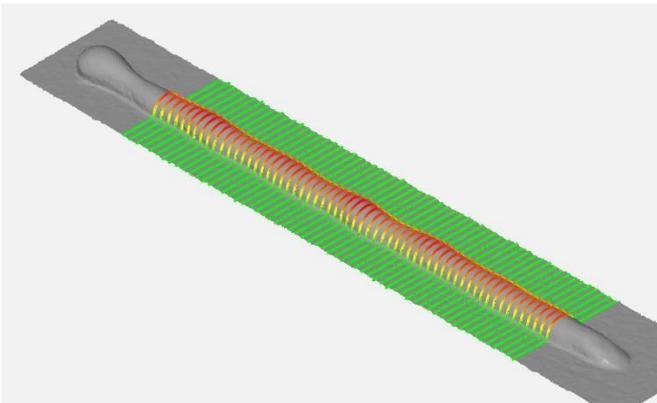


Figure 3 - Traitement du modèle numérique de la géométrie

A l'aide du logiciel GOM Inspect le nuage de points représentant la géométrie du cordon est traité et plusieurs profils de section droite du cordon espacés de 1 mm sont extraits, sur la partie stable (hors début et fin de cordon).

Différents modèles géométriques de ces profils ont été explorés dans la littérature. Ding [2] compare les associations de la géométrie réelle à des fonctions paraboliques, sinusoïdales ou encore d'arc de cercle. Dans notre cas, et en cohérence avec les travaux de Manokruang [4], l'approche retenue est celle d'un arc de cercle, particulièrement adaptée à ce matériau et angle de mouillage sur le substrat.

Ce modèle nous permet de définir aisément les dimensions usuelles du cordon à savoir son rayon R et sa hauteur H. La hauteur est calculée en ajoutant au rayon la position du centre du cercle Zc par rapport au substrat.

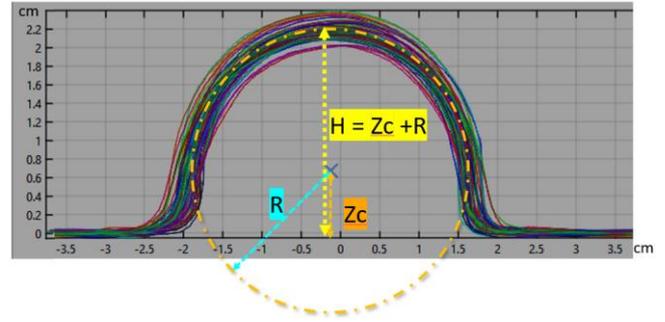


Figure 4 - Traitement du modèle numérique de la géométrie

Les profils extraits des sections sont traités par un script Python qui associe un cercle avec la méthode des moindres carrés et renvoie les valeurs du R et de la position du centre du cercle Zc. À partir de ces valeurs, l'aire de la section de chaque cordon A est calculée selon la configuration :

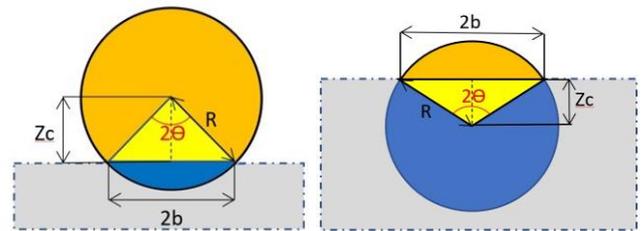


Figure 5 - Deux configurations possibles selon si le centre du cercle est au-dessus ( $Z_c > 0$ ) -ou en dessous ( $Z_c < 0$ ) du substrat.

Dans le cas où  $Z_c > 0$ , l'aire sur la plaque A est donnée par la formule :

$$A = R^2 * (\pi - \theta) + b * Zc \quad (1)$$

Or b peut s'exprimer comme  $(R * \sin \theta)$  et l'angle  $\theta$  peut est égal à  $\arccos(Zc/R)$ , donc on a :

$$A = R^2 * (\pi - \arccos(Zc/R)) + Zc * \sin(\arccos(Zc/R)) * R$$

Dans le cas où  $Z_c < 0$ , la formule devient :

$$A = \theta * R^2 - b * Zc \quad (2)$$

Donc on a :

$$A = \arccos\left(\frac{|Zc|}{R}\right) * R^2 - |Zc| * \sin\left(\arccos\left(\frac{|Zc|}{R}\right)\right) * R$$

Une fois la méthode de mesure et de modélisation mise en place, il est possible de relier les données relatives à la géométrie des cordons aux valeurs des paramètres physiques et de pilotage correspondants.

## 2.3. Gestion de la température de dépôt

Pour le cas mono-cordon rectiligne sur une plaque plane, le paramètre thermique le plus influent, Tdep, peut être obtenu par simulation thermique du procédé.

Pour paramétrer cette simulation au plus proche des conditions de fabrication réelles, les données relatives au procédé de soudage tension et intensité moyennes peuvent être relevées sur le poste Fronius suite au dépôt.

En nous basant sur ces données et sur les données géométriques, un programme de simulation thermique basé sur le logiciel Cast3m permet de calculer le champ de températures pendant le processus. Dans ce programme, développé par Akram Chergui [3], on modélise par éléments finis le processus de dépôt de matière. Sont pris en compte :

- les apports de chaleur comme la préchauffe ainsi que la chaleur contenue dans le nouveau matériau déposé et celle introduite par l'arc électrique (assimilé à une source de Goldak) ;
- les caractéristiques du matériau comme la masse volumique, la conductivité et capacité thermiques, les températures de changement de phase, la chaleur latente de fusion ;
- la dissipation d'énergie par conduction et par rayonnement ;
- les dimensions du cordon, dont la géométrie est approchée par un parallélépipède rectangle dimensionné pour conserver le volume.

Le programme calcule le champ de températures sur la plaque entière et modélise le procédé pas à pas : à chaque pas de calcul, un tronçon de cordon est déposé sur la plaque, le maillage est mis à jour et les températures sont recalculées.

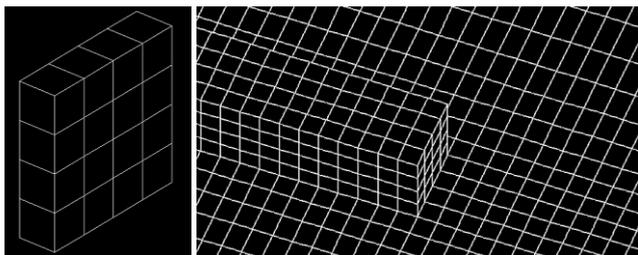


Figure 6 - Visualisation du maillage d'un tronçon de cordon et des empilements successifs pour former un cordon

A l'issue de la simulation du cordon, pour chaque pas de temps, la température au point de dépôt de matière Tdep (illustré dans la Figure 7) est révélée.

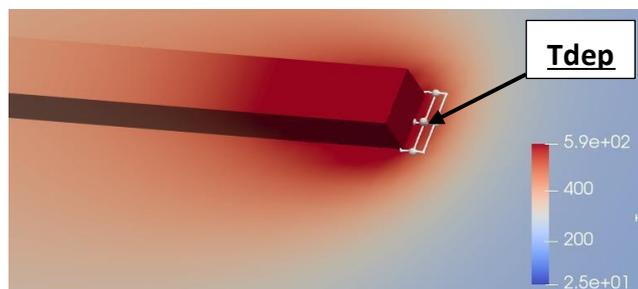


Figure 7 - Visualisation du champ de température issu de la simulation

### 3. RESULTATS

Dans le but de contrôler la géométrie de la pièce fabriquée, on recherche les paramètres opératoires à

appliquer afin de déposer localement un mono-cordon de géométrie R et H. Cet objectif passe par la mise en relation des paramètres R et H avec les paramètres physiques pilotant le procédé, notamment le débit matière donné par le rapport WFS/TS et les conditions thermiques dont une image est donnée par Tdep.

Différentes surfaces de réponse peuvent ainsi être tracées. Il est important de mentionner que la valeur saisie dans la synergie sur le poste de soudure, nommée ici WFS synergique (WFS\_S), est une valeur guide pour aider les soudeurs mais dans la complexité du fonctionnement de la source cette valeur en l'état n'est pas directement maîtrisable ni parfaitement régulée. Cette valeur est sensiblement différente du paramètre nommé WFS déposé (WFS\_D), représentant la physique du procédé réel et calculé à partir de l'aire des sections de cordons. L'écart entre ces deux valeurs dépend entre autres de la loi de synergie, de la distance torche-substrat et la température de dépôt, qui est à son tour influencée par les conditions de dépôt (WFS\_S/TS, T\_init et forme du substrat).

Le plan d'expériences réalisé se base sur des valeurs du ratio WFS\_S/TS. Cependant comme cette valeur a tendance à surestimer de 20% la valeur du ratio WFS\_D/TS, les surfaces de réponse retenues sont celles basées sur la mesure, donc utilisant WFS\_D/TS. Ainsi les expériences ont été réalisées pour un WFS\_S synergique saisi sur le poste FRONIUS de 5 m/min, mais les graphes de surface de réponse ont été tracés en fonction d'un WFS\_D calculé à partir de l'aire des cordons déposés.

#### 3.1. Lien R - H - Tdep - WFS/TS

La Figure 8 donne l'évolution du rayon du cordon en fonction de Tdep et de WFS\_D/TS. Les valeurs du rayon augmentent avec les valeurs de Tdep ou WFS\_D/TS.

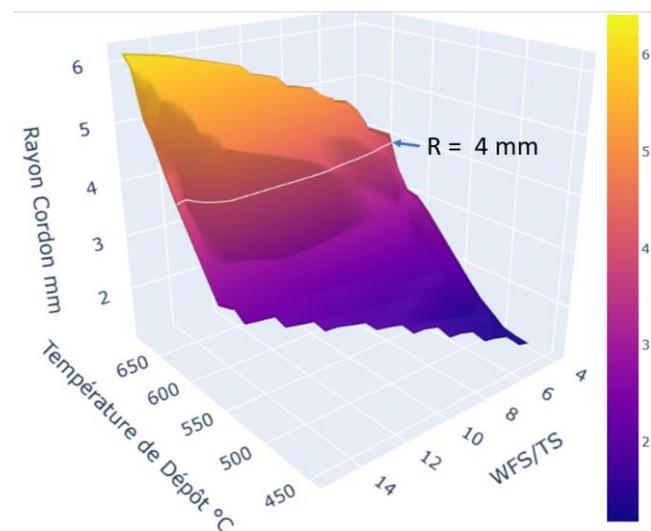


Figure 8 - Surface de réponse de R fonction de Tdep et WFS\_D/TS

La Figure 9 donne l'évolution de la hauteur du cordon en fonction de Tdep et de WFS\_D/TS

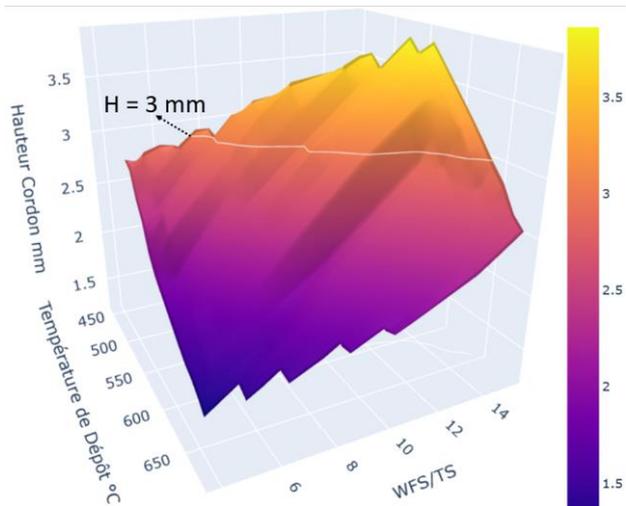


Figure 9 - Surface de réponse de H fonction de Tdep et WFS\_D/TS

Le paramètre de hauteur augmente avec des valeurs du rapport WFS\_D/TS élevées, mais contrairement à R, il diminue lorsque la température de dépôt augmente. En effet, des valeurs de WFS\_D/TS élevées signifient plus de matière déposée, donc un cordon plus gros (R et H augmentent). Alors qu'une Tdep plus élevée fait diminuer la tension superficielle du cordon [4], en conséquence, celui-ci a donc tendance à s'affaisser (R augmente, H diminue).

En associant ces deux graphes, il peut être possible de déterminer, pour un couple (R, H) choisi :

- s'il est possible de réaliser ou non un cordon avec des telles dimensions ;
- les valeurs des paramètres Tdep et WFS/TS adaptées pour réaliser ce cordon.

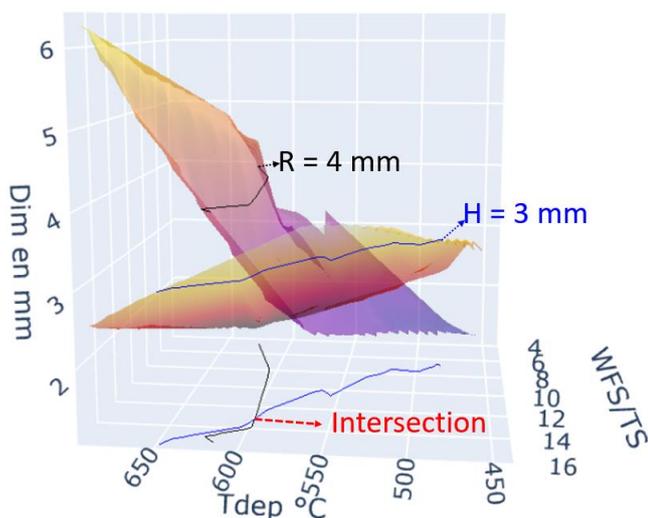


Figure 10 - Graphe Surface de Réponse de R et H en fonction de Tdep et WFS\_D/TS

Par exemple, pour un objectif de R=4 mm et H=3 mm, il est possible de calculer l'ensemble des couples (Tdep, WFS/TS) permettant, chacun d'eux pris séparément, de réaliser la géométrie cible, R ou H. Ces couples de valeurs sont matérialisés sur les Figures 7 et 8 par des courbes, résultats des intersections des plans d'iso-rayon (R=4 mm) et d'iso-hauteur (H=3 mm) avec les surfaces de

réponse respectives. Ces courbes sont ensuite projetées et superposées sur le plan Tdep - WFS/TS. S'il existe au moins un point d'intersection entre les courbes, alors d'après ce modèle il est possible de déposer un cordon avec les dimensions R et H souhaitées.

Sur la Figure 10 nous pouvons observer les deux graphes superposés. Les profils d'intersection de chaque graphe sont projetés sur le plan Tdep - WFS/TS, sur lequel nous pouvons observer une intersection. Dans ce cas, il est donc possible de réaliser un cordon de géométrie telle que R=4 mm et H=3 mm. Les paramètres Tdep, WFS\_D/TS adaptés pour ce cordon sont les coordonnées du point d'intersection des deux courbes : Tdep = 600 °C et WFS\_D/TS = 13,2. Ces valeurs sont cohérentes avec les observations au cours des expériences et simulations.

#### 4. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

En résumé, nous avons construit un modèle qui met en relation les dimensions d'un cordon, couple (R, H) avec les paramètres physiques (WFS\_D/TS, Tdep).

Un point important doit être surligné est l'influence de certains phénomènes physiques qui modifient le comportement du procédé comme par exemple l'apparition d'une double brisure de courbe visible en Figure 10, qui illustre une vue du graphe Figure 8 dans le sens de l'axe WFS/TS :

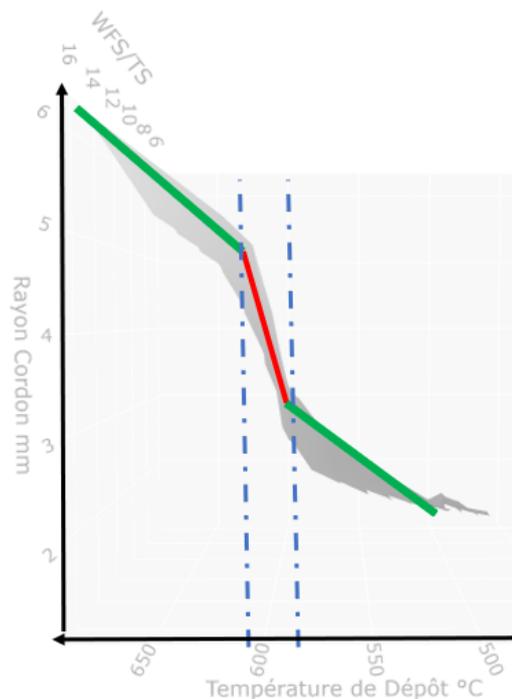


Figure 11 - Vue de profil de la surface R fonction de Tdep et WFS\_D/TS

Ce changement dans le comportement du procédé peut être mis en relation avec le changement de phase du matériau utilisé. En effet, si nous étudions le diagramme de phases des alliages Al-Mg, qui correspond au type d'alliage utilisé dans nos essais :

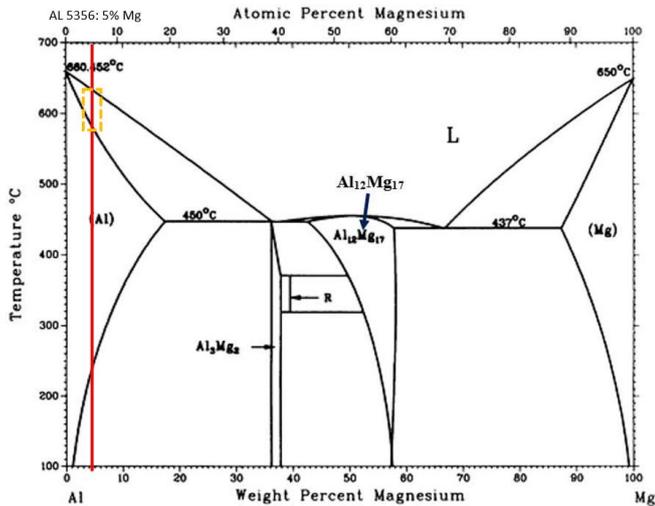


Figure 12 - Diagramme de phases alliages Al - Mg [9]

La ligne rouge verticale tracée sur la Figure 12 représente l'alliage utilisé Al 5356 à 5% de Mg. Ce matériau passe dans une phase Liquide + Solide entre 580 et 620 °C, ce qui correspond aux points de brisure de courbe vue en Figure 11.

Cette importante variation dans le rapport entre température et rayon peut mettre en doute la consistance du modèle, notamment au niveau de la faible densité de points de données dans la zone du graphe qui correspond aux températures de changement de phase.

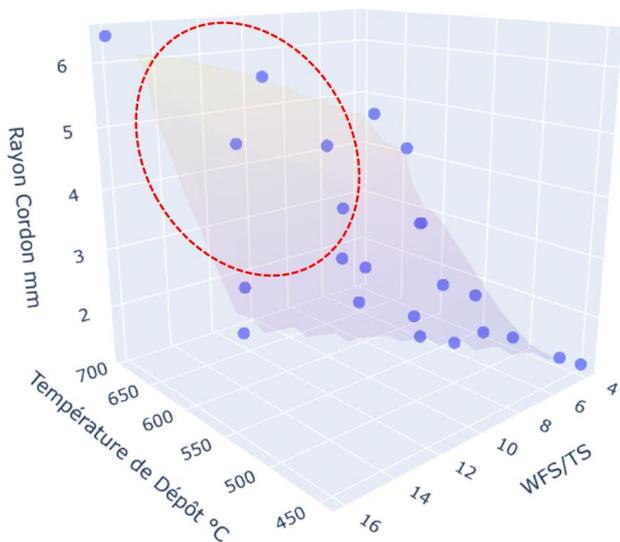


Figure 13 - Distribution des points de données du graphe Figure 7

Ce modèle doit donc tout d'abord être vérifié pour garantir que nos résultats restent cohérents. Une campagne expérimentale est prévue pour vérifier les prédictions de pilotage établies pour une géométrie (R, H) cible et pour compléter avec davantage de mesures la base de données phénoménologique.

Par la suite, le lien entre les paramètres Tdep et WFS\_D/TS avec les paramètres opératoires pilotables (T\_init, temps d'attente, WFS\_S) et la géométrie du substrat doit être établi dans les travaux.

## REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cet article font partie du projet AWESOME, financé par l'Agence Nationale de la Recherche : <https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE10-0013>

## REFERENCES

- [1] S. Suryakumar, K.P. Karunakaran, A. Bernard, U. Chandrasekhar, N. Raghavender, D. Sharma (2011). Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing. *Computer-Aided Design*, Volume 43, Issue 4: p331-p344, April 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2011.01.006>.
- [2] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, & H. Li (2015). A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM): A Review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>.
- [3] A. Chergui, F. Villeneuve, N. Béraud, F. Vignat (2022). Thermal simulation of wire arc additive manufacturing: a new material deposition and heat input modelling. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00824-7>
- [4] S. Manokruang, (2022). Phenomenological model of thermal effects on weld beads geometry produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Mechanics of materials [physics.class-ph]*. Université Grenoble Alpes 2022. English. [NNT : 2022GRAL058](https://doi.org/10.1007/s12008-021-00824-7).
- [5] F. Rouchon (2022). Contributions à la modélisation géométrique du dépôt de matière pour l'élaboration d'un jumeau numérique du procédé WAAM. *Génie mécanique [physics.class-ph]*. Université Paris-Saclay, 2022. Français. [NNT : 2022UPAST088](https://doi.org/10.1007/s12008-021-00824-7).
- [6] M.S. Mohebbi, M. Kühl, and V. Ploshikhin (2020). A thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (WAAM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(3), pp 877-891. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05647-6>
- [7] F.M. Scotti, F.R. Teixeira, L.J. da Silva, D.B. de Araújo, R.P. Reis, & A. Scotti (2020). Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007>
- [8] K. Treutler, & V. Wesling (2021). The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review. *Applied Sciences (Switzerland)* (volume 11, issue 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app11188619>
- [9] M. Akshansh (2018). Friction Stir Welding of Dissimilar Metal: A Review. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. [http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3104223](https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3104223)

# Automatisation du processus de réparation de défauts de pièces de moulage en acier par soudage

Thanh Hoang Vo <sup>a,\*</sup>, Christelle Grandvallet <sup>a</sup>, Antonin Bermond <sup>b</sup>, Eddy Bernou <sup>c</sup>, Frédéric Vignat <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 46, avenue Félix Viallet 38000 Grenoble, France

<sup>b</sup> Safe Metal, 1 Boulevard de la Boissonnette, 42110 Feurs, France

<sup>c</sup> Axive Additive, 74 Rue des Acières 42000 Saint Etienne, France

\* e-mail : thanh-hoang.vo@grenoble-inp.fr

## 1. INTRODUCTION

Le moulage en sable à vert est l'un des procédés les plus courants pour fabriquer les composants en acier. La coulée de sable vert est utilisée pour une grande variété d'applications de moulage, que ce soit des moules de petite taille ou des grands moules pesant jusqu'à 500 kg [1]. La coulée de sable à vert est en effet une méthode simple, évolutive et résiliente pour la coulée des métaux [2]. En termes de contrôle de la qualité, l'ajout en petites quantités d'oxyde de fer au sable vert permet d'empêcher la pénétration du métal dans le sable et la fissuration du moule [3].

Il y a souvent des défauts dans une pièce obtenue par moulage. Les défauts courants dans les pièces moulées en métal peuvent être divisés en cinq catégories : trous ; fissures ; défauts de surface, formes, tailles et poids non qualifiés ; composants, structures et propriétés non qualifiés [4].

La réparation des défauts de moulage doit être effectuée sans affecter la qualité du produit et conformément aux normes et réglementations techniques applicables selon le domaine d'application. La réparation par soudage est l'un des principaux processus de réparation des pièces en acier moulées. Pratiquement tous les défauts de coulée sur les pièces moulées en acier peuvent être réparés par soudage et pour cela, le soudage à l'arc est généralement utilisé.

Toutefois, la réparation de pièces moulées en acier se fait aujourd'hui manuellement par les soudeurs. Le processus de réparation s'effectue en général en 3 étapes (Figure 1) : identifier les pièces avec défauts, creuser la zone de défauts manuellement par un soudeur, et remplir la zone creusée.

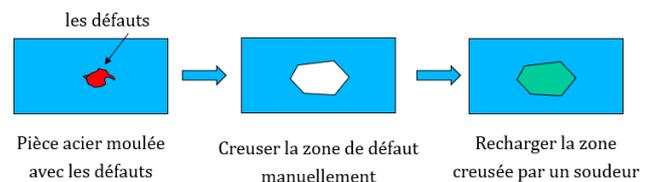


Figure 1 - Processus de la réparation par le soudeur

La qualité de la réparation dépend de l'expérience du soudeur quant aux paramètres de soudage et à la stratégie de remplissage. Dans cet article, nous souhaitons explorer l'idée d'automatiser la troisième étape de ce processus.

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un projet de collaboration entre le laboratoire G-SCOP et trois sociétés: Safe Metal (leader mondial pour les composants acier moulé en sable à vert), Axive Additive (spécialisée en fabrication additive métallique et en rechargement robotisé) et Visioshape (spécialisée en scan 3D, rétro-conception et système vision).

Cet article présentera tout d'abord la problématique et question de recherche. Ensuite l'état de l'art sur la méthode de génération de trajectoires à partir du maillage et les stratégies de remplissage sont présentés. Dans la section suivante un modèle de génération de trajectoires à partir d'un maillage est détaillé. Celui-ci est mis en application à travers une étude de cas qui permet de valider nos résultats. Enfin, une vue globale de nos résultats et les opportunités pour la suite sont présentés en conclusion de cet article.

## 2. PROBLEMATIQUE ET QUESTION DE RECHERCHE

L'objectif de cette étude est d'utiliser un robot de soudage pour recharger la zone creusée à la place d'un soudeur. Pour ce faire, il faut modéliser la forme et générer la trajectoire du robot afin de recharger cette

forme. Un processus de remplissage par un robot de soudage utilisé chez Axive Additive est présenté en Figure 2.

La première étape dans cette méthode est de numériser la pièce moulée et son défaut à réparer parce que la zone de défaut a creusé manuellement par un soudeur. Une reconstruction 3D est ensuite nécessaire du fait qu'il est difficile de travailler directement sur le maillage. Viennent ensuite les étapes suivantes : génération de la trajectoire, remplissage par le robot et validation du remplissage au regard de la géométrie et de la qualité matière. Un des inconvénients de ce processus est l'étape de reconstruction 3D. Cette étape est très coûteuse en temps quelle que soit la méthode de reconstruction choisie (manuellement avec un logiciel CAO ou par traitement du maillage). C'est pourquoi notre étude propose de la supprimer.

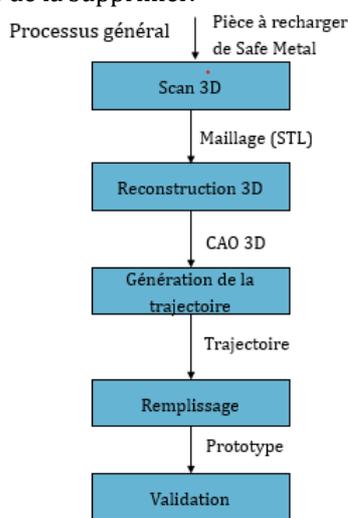


Figure 2 - Processus général de remplissage de pièce de moulage en acier

La question de recherche est alors la suivante :

**« Quelle méthode de génération de trajectoire proposer à partir d'un maillage afin de recharger à l'aide d'un robot de soudage des pièces en acier affouillées ? »**

### 3. ETAT DE L'ART

Une première étude bibliographique sur la méthode de génération de trajectoires pour remplir une forme à partir d'un maillage a été réalisée ; celle-ci n'apporte cependant pas de résultats intéressants pour notre contexte de travail pour lequel la forme à recharger est issue d'un scan 3D.

Une deuxième étude bibliographique s'est alors concentrée sur les stratégies de remplissage par soudage robotisé.

#### 3.1. Stratégie de remplissage

Plusieurs stratégies de remplissage classique peuvent être envisagées pour fabriquer des pièces par le procédé WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), Figure 3:

balayage raster [5], zigzag [6,7], contour [8,9], spirale [10,11].

La stratégie raster est basée sur la projection dans une seule direction [5]. La génération de trajectoires en zigzag est une méthode qui remplit des géométries ligne par ligne le long d'une direction comme l'approche raster. La stratégie zigzag diffère de la stratégie raster par la combinaison de lignes parallèles séparées en une seule passe continue, ce qui réduit considérablement le nombre de passes de trajectoire d'outil [6,7]. Cependant, la précision du contour de la pièce pour les approches raster et zigzag est médiocre en raison des erreurs de discrétisation sur toute arête qui n'est pas parallèle à la direction du mouvement de l'outil. La stratégie de contour peut alors résoudre le problème de qualité géométrique en suivant le modèle géométrique des contours de la pièce [8, 9]. Toutefois, en décalant les contours, le schéma génère de nombreuses courbes fermées. Enfin, la génération de trajectoires en spirales est largement appliquée dans l'usinage à commande numérique, mais ne convient que pour certains modèles géométriques spéciaux dans le remplissage [10, 11].

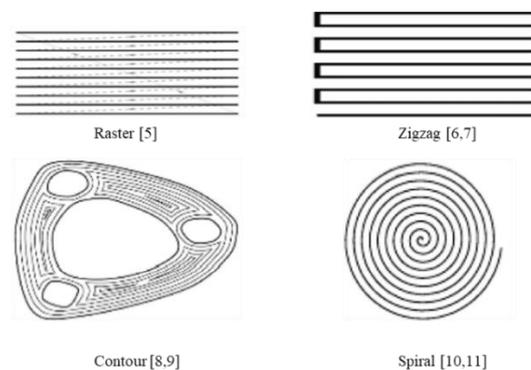


Figure 3 - Stratégie de remplissage

Plusieurs adaptations à ces stratégies classiques existent pour des formes plus complexes. La première adaptation de la stratégie en zigzag réalisée dans le WAAM a été proposée plusieurs années auparavant par Dwivedi et Kovacevic [12]. Cette stratégie a été dite continue (Figure 4a), consistant en des trajectoires en zigzag prévues pour laisser des espaces échelonnés entre les trajectoires, de telle sorte que les espaces soient séquentiellement comblés par une autre trajectoire en zigzag en sens inverse. Il est à noter que la stratégie continue peut-être adaptée à d'autres stratégies, par exemple en spirale, comme illustré sur la Figure 4b.

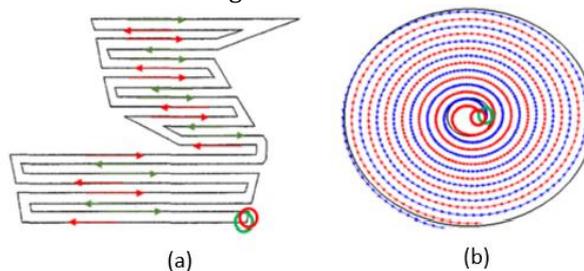


Figure 4 - Les adaptations aux les stratégies de remplissage classique ; (a) continue en zigzag ; (b) continue en spirale

### 3.2. Conclusion et démarche

Les travaux existants dans la littérature ne montrent pas de méthodes spécifiques de génération des trajectoires à partir d'un maillage. Une stratégie de remplissage dédiée à la réparation de pièce est proposée dans la section suivante.

Bien que différentes stratégies de remplissage soient étudiées dans la littérature, aucune étude actuelle ne permet de faire le choix entre ces stratégies afin de recharger notre pièce. Une étape de choix de la stratégie de remplissage doit alors être intégrée dans le processus de génération de trajectoire.

## 4. MODELE DE GENERATION DE LA TRAJECTOIRE ET VALIDATION

Dans cette section, un processus de génération de la trajectoire proposée est présenté. Ensuite, une étude de cas nous permet de tester et valider le processus proposé.

### 4.1. Processus de génération de la trajectoire

Les étapes du processus de génération de trajectoire que nous proposons sont présentées dans la Figure 5.



Figure 5 - Processus de génération de la trajectoire

#### 4.1.1. Scan 3D

Plusieurs plaques comportant les formes usuelles à remplir sont proposées par Safe Metal (Figure 6).



Figure 6 - Plaques de Safe Metal

Dans cette étape, ces plaques sont scannées par un scan portable Go ! Scan3D pour obtenir un fichier CAO 3D au format STL (Figure 7). Ces fichiers nous permettent aussi de déduire les dimensions des formes (largeur, longueur et profondeur) à recharger.

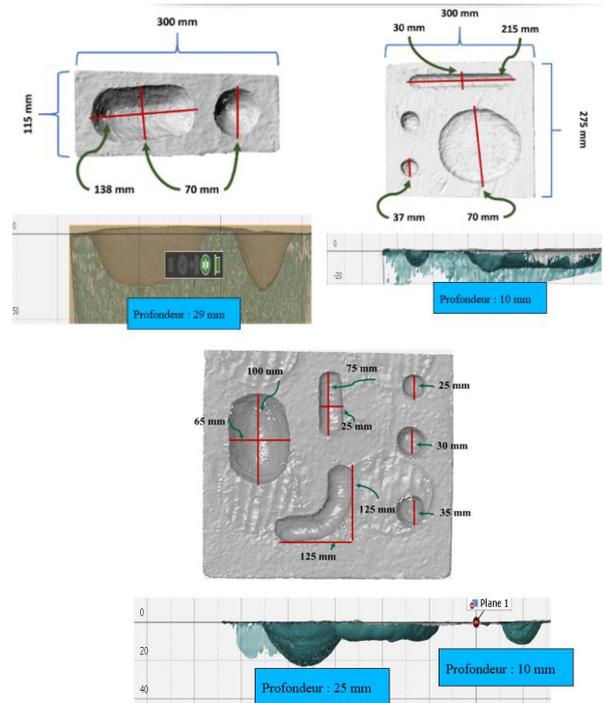


Figure 7 - Résultats du scan 3D

### 4.1.2. Regrouper les formes et Choisir la stratégie de remplissage

Dans cette étape, les formes sont regroupées afin de faciliter l'automatisation de la génération des trajectoires.

Les formes proposées par Safe Metal peuvent être regroupées en deux catégories au regard de l'expérience de soudage par Axive Additive et de l'expérience de génération de trajectoires par G-SCOP. Ce regroupement est effectué en fonction de la stratégie de remplissage associée : les formes linéaires (Figure 8) et Les formes circulaires (Figure 9) :



Figure 8 - Les formes linéaires

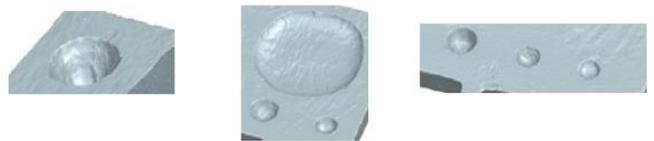


Figure 9 - Les formes circulaires

Dans cette étude, la stratégie de remplissage est choisie par l'étude bibliographique et l'expérience de Axive Additive. En effet, étant donné que la bibliographie ne nous donne pas d'éléments pour choisir la bonne stratégie de remplissage pour nos formes, il a été décidé d'opter pour les stratégies de remplissage en zigzag et raster pour les formes linéaires. Pour les formes circulaires, les stratégies en spirale ou par cercles concentriques (profils en parallèle et concentriques) sont utilisées.

### 4.1.3. Génération de la trajectoire

Un modèle de génération de la trajectoire a été développé avec l'outil Rhino – Grasshopper (Figure 10) qui inclut des étapes communes à tout type de remplissage et des étapes correspondant à la stratégie de remplissage choisie.

Cette étude est faite avec l'hypothèse que la torche est en position verticale lors de la fabrication.

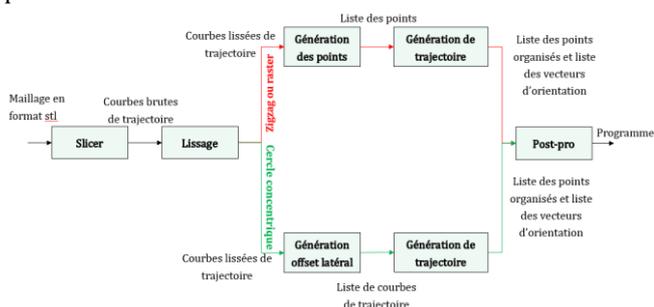


Figure 10 - Modèle de génération de trajectoire

- Deux étapes communes sont identifiées pour toutes les stratégies de remplissage : Slicer et Lissage

➤ **Slicer** : Comme tous les processus de fabrication additive, un tranchage avec des plans parallèles a été utilisé. Celui-ci est horizontal. La sortie de cette étape est l'obtention de courbes brute de trajectoires.

➤ **Lissage des contours** : l'objectif de cette étape est de lisser les courbes de trajectoire qu'on a obtenues à partir de l'étape précédente. Ce lissage est important du fait que l'on part du fichier du scan 3D et que les courbes de trajectoires ont toujours des passages qui génèrent des trajectoires difficiles à suivre par le robot (Figure 11). La courbe de trajectoires a été discrétisée par des points avec une distance constante (dc). Ces points sont utilisés comme des points de contrôle afin de créer une nouvelle courbe de trajectoires (Figure 12).

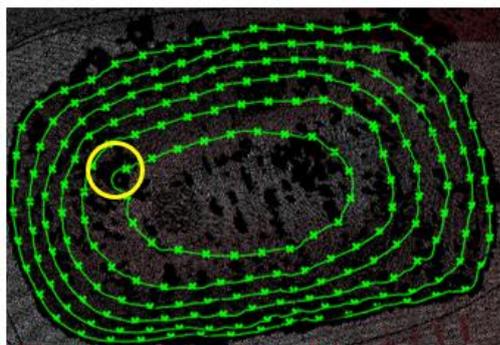


Figure 11 - Discrétisation de la courbe de trajectoires avec une distance constante

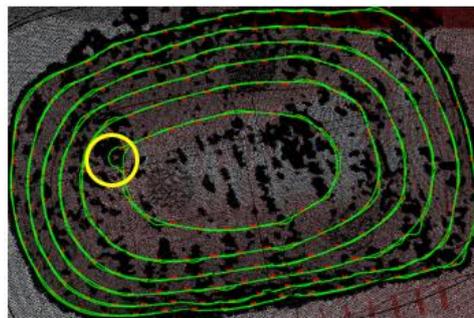


Figure 12 - Courbe de trajectoires après lissage

La qualité de la courbe après lissage dépend du paramètre de discrétisations (distance constante) (Figure 13). L'écart maximum entre la courbe brute et la courbe lissée est calculé. Cette valeur doit être inférieure de la moitié de la largeur du cordon de soudure pour éviter de créer des trous entre deux cordons de soudure. On la considère ainsi comme un critère de validation pour cette étape.

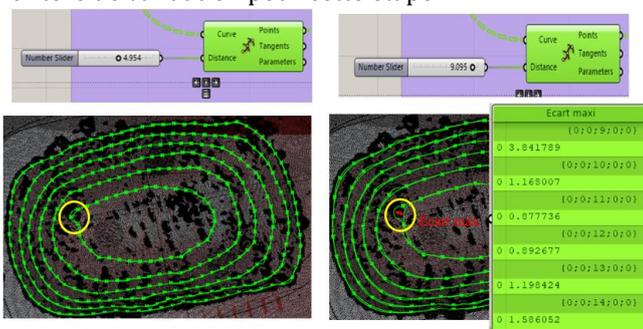


Figure 13 - Influence de la distance entre les points

- Les étapes pour la stratégie de remplissage en Zigzag ou Raster sont présentées en Figure 14:

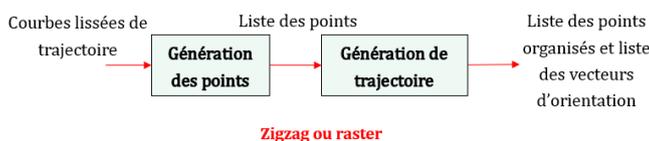


Figure 14 - Génération de la trajectoire pour la stratégie de remplissage par zigzag ou raster

➤ **Génération des points** : L'objectif de cette étape est de créer les points de la trajectoire à partir du contour de la couche considérée. Le but est de générer la trajectoire afin de remplir la partie intérieure de ce contour. Pour une couche, la direction des cordons de soudure est déterminée par le soudeur (cf ligne rouge sur la Figure 15). La forme de cette couche sera remplie par plusieurs cordons parallèles avec une distance déterminée par le soudeur selon les paramètres de la fabrication. L'objectif est de d'avoir un bon remplissage de la couche. Les points de départ et de fin de chaque cordon sont déterminés dans cette étape par l'intersection entre plusieurs plans parallèles avec la direction de la fabrication des cordons soudures (Figure 16a) et le contour. Les points sont présentés dans la Figure 16b.

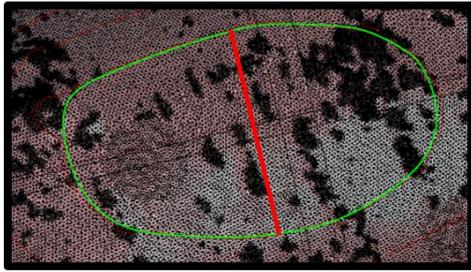


Figure 15 - Direction du cordon de soudure

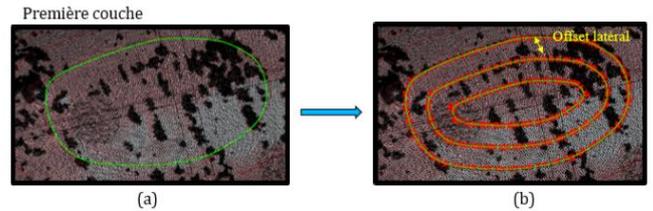


Figure 20 - Génération des offsets latéraux

➤ **Génération de trajectoires** : les points de la trajectoire sont obtenus en discrétisant les courbes issues de l'étape précédente. La trajectoire de remplissage pour cette couche est présentée en Figure 21. Selon la forme à remplir, le soudeur peut décider que la trajectoire démarre de l'intérieur vers l'extérieur ou inversement.

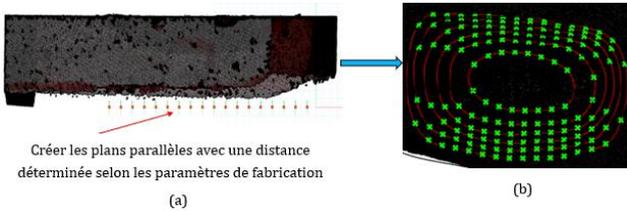


Figure 16 - Génération des points

➤ **Génération des trajectoires** : les différentes trajectoires sont générées en utilisant les points de trajectoire de l'étape précédente. Par exemple, le remplissage par zigzag (Figure 17), et le remplissage par raster (Figure 18).

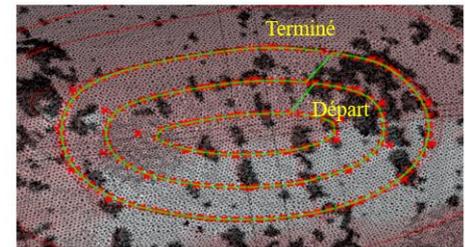


Figure 21 - Remplissage en cercles concentriques

- **Post-processeur** : il génère le programme correspondant au type de robot de soudure.

Ce modèle de génération de trajectoires est développé pour quelques stratégies de remplissage choisies en prenant en compte les recommandations des travaux existants, ainsi que les expériences de soudure par la fabrication additive de type WAAM.

Les stratégies de remplissage proposées dans cette étude ont été validées par les essais de remplissage de Axive Additive. Ceux-ci sont présentés dans la section suivante.

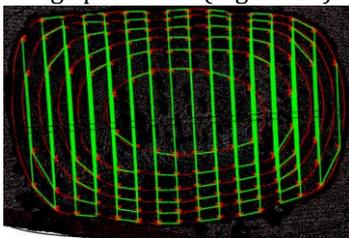


Figure 17 - Remplissage en zigzags

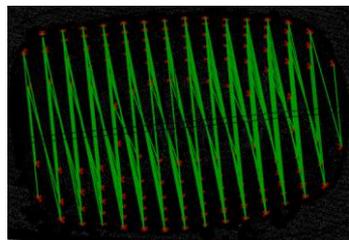


Figure 18 - Remplissage par raster

#### 4.2. Expérimentation

Cette section montre l'application de nos stratégies de remplissage lors d'essais effectués par Axive Additive. Le premier essai de remplissage a permis d'obtenir une forme linéaire en utilisant le remplissage en zigzags (Figure 22).

- Etapes pour la stratégie de remplissage en cercles concentriques (Figure 19) :

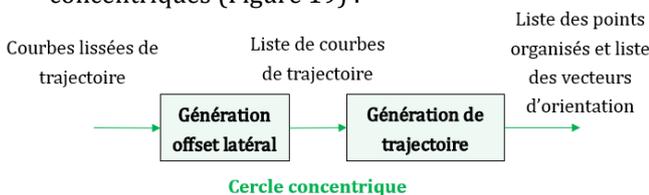


Figure 19 - Génération de la trajectoire avec la stratégie de remplissage par cercles concentriques

➤ **Génération des offsets latéraux** (Figure 20) : pour chaque couche de fabrication, un contour est généré par l'étape précédente. L'idée est ensuite de créer plusieurs courbes de trajectoires avec une distance égale à l'offset latéral comme indiqué en Figure 20b.

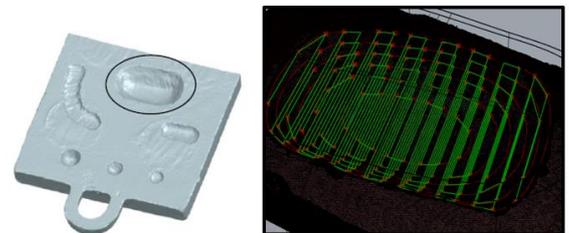


Figure 22 - Essai de remplissage en zigzags

Le résultat en Figure 23 montre une forme finale remplie avec 6 couches de fabrication.



Figure 23 - Résultat du premier essai

Un second essai a consisté en un remplissage d'une forme ronde et conique avec la stratégie de remplissage en cercles concentriques (Figure 24).

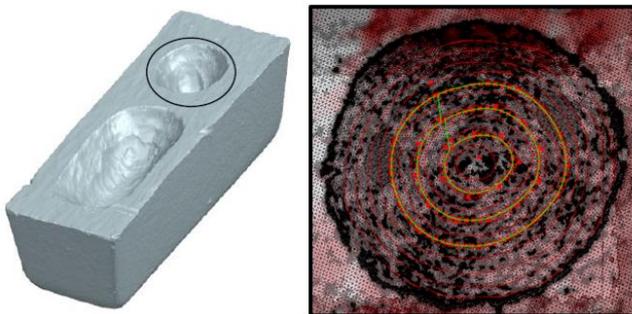


Figure 24 - Essai de remplissage en cercles concentriques

Le résultat du deuxième essai est montré en Figure 25. La forme a été remplie avec 8 couches de cordons par WAAM.



Figure 25 - Résultat du deuxième essai de remplissage

Par conséquent, une analyse visuelle rapide des géométries de ces deux prototypes nous permet de valider les stratégies de remplissage et les trajectoires générées par notre modèle.

Une analyse de la santé-matière des pièces obtenues doit être encore effectuée par la suite afin de vérifier les éventuels défauts intérieurs de ces composants et valider si l'on peut réparer des pièces de moulage en acier grâce à une automatisation du processus de réparation.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Dans ce travail de recherche, un premier modèle d'automatisation du processus de réparation de défauts

de pièces de moulage en acier par soudage a été développé.

Le résultat le plus important de cette étude est la proposition d'une méthode de génération de trajectoires de remplissage à partir du résultat de scan 3D (maillage). Ce modèle de génération de trajectoires peut être valable quel que soit le matériau. Deux types de stratégies de remplissage sont exploités et expérimentés dans ce papier : la stratégie de remplissage en zigzag et la stratégie en cercles concentriques.

En termes de perspectives, il serait bon d'adapter l'orientation de la torche au niveau de la géométrie afin d'augmenter la qualité du produit final. Aussi, une comparaison expérimentale entre les deux méthodes de génération de trajectoire proposée pour une même forme serait intéressante. De même, une étude sur les autres possibilités de stratégies de remplissage pourrait être développée par la suite. Enfin, l'optimisation du modèle de génération de trajectoires est aussi importante à développer afin de diminuer le temps de génération de trajectoire.

## REMERCIEMENTS

Financé par la Région Auvergne Rhône Alpes dans le cadre du dispositif R&D Booster Auvergne-Rhône-Alpes.

## RÉFÉRENCES

- [1] Y. Gurey, et coll., Waste Management, 2010, 30, 1705
- [2] D.G. Mahto Casting and Casting Processes, 2017, DOI: 10.2139/ssrn.2776565.
- [3] T. V. R. Rao, Metal Casting: Principles and Practice, 2007, New Age International, New Delhi
- [4] RAO, P. N. Manufacturing Technology Foundry, Forming, and Welding, Tata McGraw-Hill, New Delhi. 1999.
- [5] Dunlavey, M.R., Efficient polygon-filling algorithms for raster displays. ACM Transactions on Graphics (Tog), 2(4), pp.264-273, 1983.
- [6] Ferreira, R. P., Vilarinho, L. O., & Scotti, A. Development and implementation of a software for wire arc additive manufacturing preprocessing planning: trajectory planning and machine code generation. Welding in the World, 66(3), 455-470, 2022.
- [7] Rajan, V.T., Srinivasan, V. and Tarabanis, K.A., The optimal zigzag direction for filling a two-dimensional region. Rapid Prototyping Journal, 2001.
- [8] Farouki, R.T., Koenig, T., Tarabanis, K.A., Korein, J.U. and Batchelder, J.S., Path planning with offset curves for layered fabrication processes. Journal of Manufacturing Systems, 14(5), pp.355-368, 1995.
- [9] Yang, Y., Loh, H.T., Fuh, J.Y.H. and Wang, Y.G., Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing. Rapid Prototyping Journal, 2002.
- [10] Li, H., Dong, Z. and Vickers, G.W., Optimal toolpath pattern identification for single island, sculptured part rough machining using fuzzy pattern analysis. Computer-Aided Design, 26(11), pp.787-795, 1994.
- [11] Wang, H., Jang, P. and Stori, J.A., A metric-based approach to two-dimensional (2D) tool-path optimization for high-speed machining. J. Manuf. Sci. Eng., 127(1), pp.33-48, 2005
- [12] Dwivedi, R., & Kovacevic, R. Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding. Journal of Manufacturing Systems, 23(4), 278-291, 2004.

# Jumeau Numérique de systèmes de production : la synchronisation modèle virtuel / système réel en pratique

Farah Abdoune <sup>a,b</sup>, Olivier Cardin <sup>a,b</sup> \*, Maroua Nouri <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes, France

<sup>b</sup> IUT de Nantes, S.Mart Pays-de-Loire, 2 avenue du Pr J. Rouxel, 44470 Carquefou, France

\* e-mail : Olivier.cardin@univ-nantes.fr

## 1. INTRODUCTION

Le jumeau numérique (JN) est aujourd'hui largement considéré comme un pilier essentiel de ce que l'on appelle la quatrième révolution industrielle, et il est à l'origine de plusieurs travaux de recherche dans les milieux académiques et industriels. [1] a défini le JN comme "un ensemble de modèles adaptatifs qui émulent le comportement d'un système physique dans un système virtuel recevant des données en temps réel pour se mettre à jour tout au long de son cycle de vie. Le JN reproduit les comportements du système physique afin de prédire les défaillances et les possibilités de changement, de prescrire des actions en temps réel pour optimiser et/ou atténuer les événements inattendus, d'observer et d'évaluer le système de profil opérationnel". Le JN a été identifié comme un modèle de simulation synchronisé d'un actif physique avec une connexion et une synchronisation en temps réel avec son environnement réel. L'objectif principal du JN est d'être capable d'évaluer le comportement actuel du système et d'aider à anticiper les événements à venir.

Les enjeux de ce paradigme sont importants et reposent sur le potentiel croissant de l'exploitation du comportement intelligent dans un nombre croissant de systèmes. La surveillance, le diagnostic, le pronostic, l'auto-évolution et la prévisibilité ne sont que quelques-unes des attentes des JN. L'avancée significative des technologies numériques telles que l'Internet des objets, l'intelligence artificielle et le big data permet de collecter et d'analyser de grandes quantités de données en temps réel, offrant ainsi un potentiel précieux pour des fonctionnalités JN améliorées. Cependant, il reste encore beaucoup à accomplir et la moindre contribution dans le domaine de la JN présenterait une avancée significative pour la communauté des chercheurs.

Le JN est souvent utilisée pour surveiller les systèmes de production. Ces systèmes sont connus pour être dynamiques, peuvent présenter un comportement stochastique et sont sujets à la variabilité de leurs résultats. Par conséquent, plus le modèle de JN utilisé pour représenter le comportement dynamique du système est précis, plus les chances d'améliorer la fiabilité et les performances du système sont grandes [2]. Cependant, le modèle est-il toujours parfait ?

Dans la plupart des cas du monde réel, la réponse est non car un modèle ne peut jamais être une représentation complète d'un système physique [3]. Lors de la modélisation du JN, il y aura toujours un certain degré d'incertitude concernant la capacité du modèle à capturer avec précision les données du système surveillé et à se synchroniser avec la contrepartie virtuelle. En général, la nature inhérente des systèmes de production peut entraîner une variation des paramètres ou l'apparition d'événements inattendus. Il peut également y avoir des erreurs de modélisation ou du bruit dans la mesure des données. En outre, l'environnement physique a des propriétés uniques, comme l'échelle différente des environnements physiques et virtuels, et les données générées continuellement par de nombreuses entités en même temps.

Pour cette raison, la synchronisation en temps réel entre le JN et le système physique a longtemps été une source de discussion. L'accès en temps réel aux données recueillies est nécessaire pour une exécution réussie du JN. Cependant, la synchronisation en temps réel est un défi majeur en raison des propriétés uniques de l'environnement physique susmentionné [4] et des incertitudes du modèle. L'absence d'un mécanisme de synchronisation fiable entraînerait une communication à forte latence entre le système physique et le JN, ce qui se traduirait par une représentation inexacte du processus

réel [5]. Des recherches antérieures ont été entreprises dans la littérature pour résoudre le problème de synchronisation JN, mais il manque un mécanisme générique pour les jumeaux numériques basés sur des capteurs en temps réel dans les systèmes industriels.

Pour répondre aux limitations actuelles des travaux de recherche existants, l'objectif de cet article est de contribuer à un mécanisme de synchronisation en temps réel des jumeaux numériques au niveau du terrain des systèmes de production et à une preuve de concept de la méthode proposée sur une chaîne de montage. Le reste de l'article est organisé comme suit. La section 2 donne un bref aperçu de l'état de l'art, la section 3 décrit le mécanisme de synchronisation, la section 4 présente l'étude de cas, la section 5 présente une discussion et enfin, quelques remarques finales sont fournies dans la section 6.

Ces travaux ont été la base de la formation éponyme organisée conjointement par S.Mart Pays-de-Loire, l'IUT de Nantes et le LS2N en Décembre 2022 sur son site de l'IUT de Nantes.

## 2. ETAT DE L'ART

En raison du besoin pressant des entreprises industrielles d'optimiser le comportement dynamique des systèmes de production, les jumeaux numériques ont connu un regain d'intérêt au cours des dernières décennies. Les jumeaux numériques utilisent les meilleures représentations disponibles et des modèles physiques et virtuels pour réaliser le contrôle des conditions de fonctionnement des systèmes réels correspondants [6]. Le JN peut être considérée comme une représentation virtuelle d'un système réel qui est mise à jour en permanence et synchronisée avec son homologue physique [7]. Ce lien permet d'acquérir des données en temps réel de l'actif physique, d'effectuer des simulations et d'envoyer un retour d'information au monde physique pour corriger le comportement réel de l'actif réel. Un JN réussi repose sur une synchronisation en temps réel avec le terrain. Dans ce contexte, plusieurs travaux de recherche ont été menés pour traiter de la synchronisation.

Certains travaux ont tenté de concevoir le JN pour l'ensemble du système tandis que d'autres ont abordé le problème au niveau de la machine. Dans le domaine de la production et de la logistique, par exemple, la méthode proposée dans [8] utilise un modèle d'optimisation pour synchroniser les états du JN et de l'actif physique pendant la phase de production. Dans une recherche antérieure, pour créer un système de soutien pour les contrôles de cohérence basés sur des règles et pour synchroniser les modèles d'ingénierie du JN de l'automatisation de la production sur la base de la méthode des points d'ancrage, cet article analyse les défis spécifiques au domaine dans le code logiciel d'automatisation [9]. [10] proposent un système de JN multi-niveaux basé sur le cloud computing pour surveiller, décider et contrôler un système logistique de production synchronisé en temps réel. Dans le même

contexte, [11] analysent les questions et les difficultés associées au mode de fonctionnement de l'étape de transport, la perception de la dynamique, et la gestion et le contrôle de la synchronisation entre les étapes relatives dans l'environnement dynamique en utilisant le système de logistique de production d'un parc industriel. Un mécanisme de contrôle de synchronisation dynamique en temps réel est développé pour synchroniser le système de logistique de production tout au long de l'étape de transport. [12] proposent un cadre pour l'ordonnancement robuste qui est appliqué à un problème d'ordonnancement de type "flow shop" en se synchronisant avec le terrain via un JN. Les auteurs de [13] proposent une infrastructure logicielle qui met en œuvre une synchronisation entièrement bidirectionnelle entre les mondes physique et numérique, basée sur un middleware de l'Internet industriel des objets orienté message et construit sur une interaction de type publish-subscribe. Le middleware gère le flux de données en temps réel, ou télémétrie de l'usine, qui comprend toutes les données, à savoir les variables contrôlées qui sont surveillées et proviennent de l'usine, ainsi que les instructions des actionneurs. Les répliques numériques synchronisées dynamiquement des systèmes réels aident à la configuration. Un mécanisme de synchronisation basé sur la programmation en nombres entiers mixtes est proposé par [14]. Un modèle équivalent de programmation par contraintes est développé et mis à l'épreuve pour répondre à l'exigence de prise de décision rapide dans des problèmes réels de synchronisation de la logistique et de la production en atelier. [15] démontrent comment les valeurs des paramètres peuvent être apprises à partir des données de mesure tout en conservant des modèles analytiques interprétables et robustes, ce qui permet de synchroniser les jumeaux numériques de manière précise et efficace avec le comportement du monde réel. [16] proposent un système de synchronisation en temps réel qui utilise des jumeaux numériques haute-fidélité pour permettre une information en temps réel sur l'état des ressources et l'avancement de la construction.

Dans l'ensemble, les articles examinés s'intéressent au défi que représente la synchronisation du JN avec le système physique. Cependant, malgré leur intérêt, dans la plupart des articles, la synchronisation en temps réel est mentionnée comme un objectif à atteindre ou comme une caractéristique que le JN doit avoir sans autre explication sur le mécanisme utilisé. Alors que dans d'autres articles, le mécanisme de synchronisation est élaboré pour d'autres niveaux que le terrain, comme le niveau de gestion, de planification ou de contrôle de la pyramide de l'automatisation. En conséquence, nous pouvons conclure que la littérature manque cruellement de mécanismes qualitatifs et robustes pour la synchronisation en temps réel au niveau du terrain dans les systèmes de production. On pourrait donner plus de pouvoir à un JN pour combler cette lacune en intégrant un mécanisme fiable pour réaliser la synchronisation en temps réel. Par conséquent, le présent travail aborde une question de recherche principale : Quel est le mécanisme

approprié pour la synchronisation en temps réel du JN avec le système de production au niveau du terrain pour assurer une mise à jour fiable ?

### 3. MECANISME DE SYNCHRONISATION

Cette section vise à représenter le mécanisme de synchronisation à l'aide d'un formalisme générique. Le formalisme utilisé doit être dynamique et représenter des séquences d'événements pour montrer la synchronisation des événements et des choix. Pour cette raison, nous choisissons les réseaux de Petri (RP) pour décrire le mécanisme de synchronisation JN des systèmes de production. Les RP sont largement utilisés dans la modélisation et l'analyse de simulation de systèmes à événements discrets tels que les systèmes de production [17] en raison de leur capacité à décrire et à analyser le comportement du système de manière très efficace en utilisant des expressions mathématiques strictes et des expressions graphiques intuitives. Pour construire le mécanisme de synchronisation entre le JN et le système physique, un modèle de RP a été défini comme suit :

$$RP : (P, T, A, w)$$

Où :

$P$  est un ensemble fini de places :

$$P = \{p1, p2, p3, p4, p5, p6\}$$

$T$  un ensemble fini de transitions

$$T = \{t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8\}$$

$A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  est un ensemble d'arcs allant des places aux transitions et des transitions aux places dans le graphe.

$w$  est le poids de chaque arc

$x0 \in N_n$  est l'état initial du réseau (c'est-à-dire le nombre initial de jetons dans chaque place).

$$X0 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

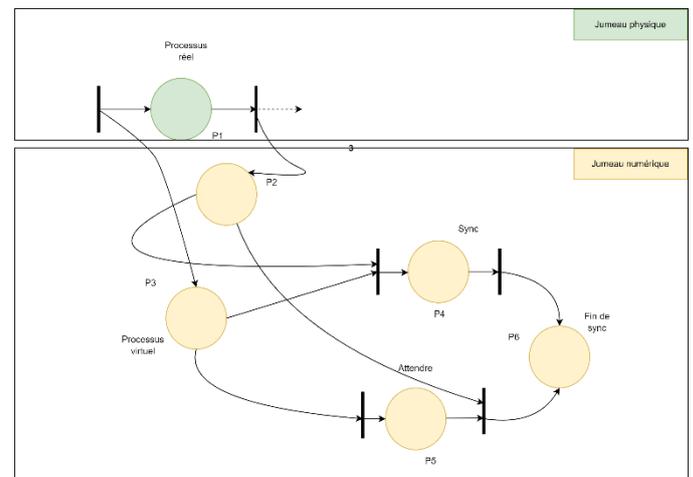
$X^m \subseteq N_n$  est l'ensemble des états marqués du réseau.

La figure 1 présente le modèle de RP de la synchronisation avec les états marqués. Lorsqu'un processus réel arrive, le JN est déclenché pour créer un événement. Ensuite, les deux contreparties, à savoir le jumeau physique et le JN, doivent être synchronisés pour éviter toute déviation ou erreur. Nous pouvons distinguer deux cas : le premier est celui où le jumeau physique est en retard sur le JN. Ou dans le cas contraire, lorsque l'événement se déclenche dans le jumeau physique plus tôt que dans le jumeau numérique, le retard s'accumule et donc les deux modèles ne sont plus synchronisés. Pour mieux comprendre, les sous-sections suivantes illustrent ces cas sur l'exemple trivial d'un processus manuel sur un poste de travail. Une durée estimée est implémentée comme paramètre du modèle virtuel, mais il est évident que la durée réelle du processus réel souffrira d'une variabilité importante.

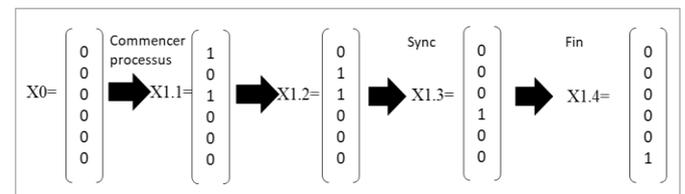
**Cas (1) :** le jumeau physique est en avance. Lorsque le processus réel démarre, il est détecté (la technologie de détection est hors de portée ici), et un jeton est créé dans P3 de le JN comme dans l'état marqué (X1.1). Si le

processus réel se termine plus tôt que ce qui a été estimé par le JN, comme illustré dans (X1.2), le processus virtuel doit être complété immédiatement. Par conséquent, une action de synchronisation est exécutée pour faire correspondre l'heure de fin du processus et l'état du produit associé entre le JN et la réalité (X1.3). Une fois cette action effectuée, le marquage en P6 reconnaît la fin de la synchronisation (X1.4).

**Cas (2) :** le jumeau physique est en retard. D'autre part, lorsque le processus manuel prend plus de temps que prévu pour se terminer, le processus virtuel en JN se terminera plus tôt que la réalité (X2.1). Dans ce cas, le processus virtuel est bloqué pour attendre l'arrivée de l'information de fin du processus réel (X2.2). Une fois les deux processus terminés (X2.3), un accusé de réception de la synchronisation est déclenché (X2.4).



Cas (1)



Cas (2)

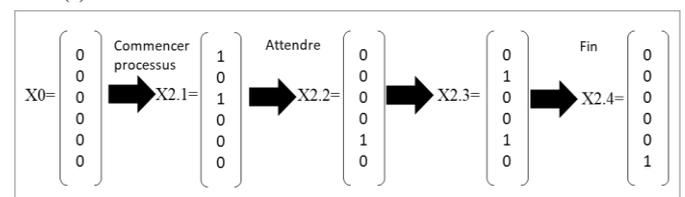


Figure 1. Mécanisme de synchronisation

## 4. ETUDE DE CAS

### 4.1. Description du système de production

Pour valider le mécanisme de synchronisation proposé, une étude de cas sur une ligne d'assemblage est considérée. SOFAL (Service-oriented Flexible Assembly Line) est une ligne d'assemblage située dans le laboratoire de l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Nantes, présentée sur la figure 2. Cette ligne a

été construite autour d'un système de convoyeurs à segments. Quatre convoyeurs ont été disposés, équipés de 3 systèmes de transfert entre convoyeurs (échangeurs) et de 3 systèmes de transfert entre convoyeurs et stations (alimentateurs) comme le montre la figure. 30 palettes circulent sur ce convoyeur, chacune étant capable de recevoir un produit et de le transporter de poste en poste pour achever sa production. A chaque poste de travail, un robot de type Pick & Place dédié à la manipulation des blocs Lego est installé.

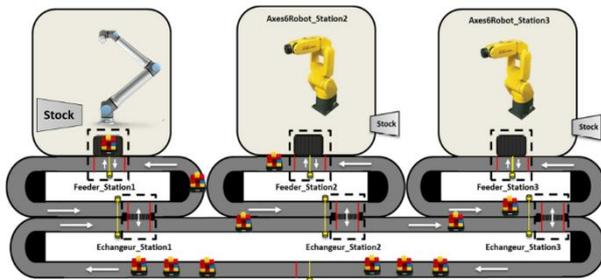


Figure 2. Schéma de la ligne d'assemblage SOFAL [18]

#### 4.2. Configuration expérimentale

La figure 3 présente l'architecture de mise en place de l'étude de cas. Pour construire notre JN, un modèle virtuel est construit en utilisant la simulation à événements discrets avec le logiciel Flexsim composé d'un espace de travail 3D et d'un espace de flux de processus ayant la même logique qu'un RP. Le modèle communique avec les automates programmables industriels (APIs) Beckhoff de la chaîne de montage par l'intermédiaire d'un serveur OPC UA via un module d'émulation pour obtenir des données telles que le nombre de palettes entrantes à partir des lecteurs d'étiquettes RFID et des signaux provenant des capteurs et des actionneurs. Pour lancer les commandes de production, la ligne est connectée à un contrôleur Raspberry PI via le protocole Automation Device Specification (ADS). Ainsi, le Raspberry PI dispose d'une base de données des différents ordres de production possibles. Le modèle virtuel est connecté directement à cette base de données pour récupérer les opérations en cours dans le système. Compte tenu de la complexité du modèle virtuel et du mécanisme de synchronisation utilisé, il est plus facile, dans le cadre de cette étude, de simplifier la description du mécanisme de synchronisation en prenant comme exemple deux lecteurs d'étiquettes RFID (RFID1, RFID2) du système physique, qui correspondent à deux points de décision dans le modèle virtuel (DP1, DP2).

#### 4.3. Mécanisme de synchronisation

Dans Flexsim, nous avons créé le mécanisme proposé dans la Figure 4 comme suit. Pour commencer, nous devons créer les palettes virtuelles dans la partie 3D du modèle et les stocker dans une file d'attente (File d'attente 1) en attendant l'arrivée des palettes réelles. Dans la section du flux de processus, pour identifier

chaque palette, nous ajoutons une étiquette d'identification pour représenter le numéro de chaque palette créée de 1 à 30. Pour ce faire, nous ajoutons une liste de palettes et nous poussons vers la liste l'ID créé dans celle-ci. Cette liste nous aidera plus tard à garder la trace des palettes.

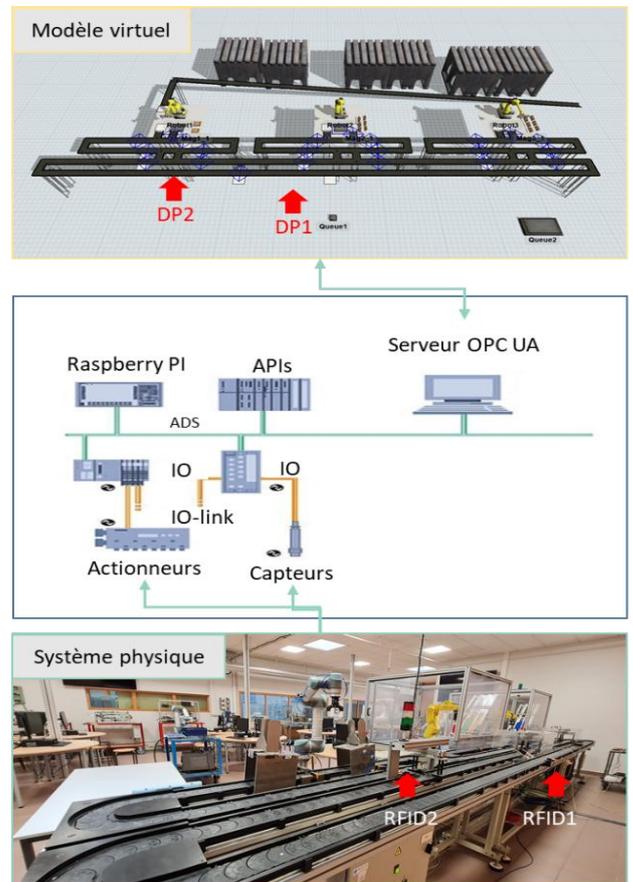


Figure 3. Architecture d'implémentation

L'outil d'émulation est configuré pour être connecté au serveur OPC UA et les différents capteurs, actionneurs et étiquettes RFID sont ajoutés. Lorsqu'une variable est déclenchée via OPC UA par le système physique, c'est-à-dire lorsqu'il y a un changement dans le système, un message est envoyé au flux de processus du modèle. Lorsqu'une palette réelle arrive à une étiquette RFID donnée, nous recevons un jeton dans le message déclenché à la source avec l'ID de la RFID pour identifier l'expéditeur et l'ID de la palette réelle. Les attributs du message sont affectés à la palette créée. Ensuite, si la valeur de RFID > 0, nous devons identifier la palette à synchroniser. Nous tirons de la liste des palettes, la palette correspondante qui a le même numéro que la palette réelle.

Pendant ce temps, une autre file d'attente (File d'attente 2) est créée comme tampon intermédiaire connecté à l'entrée du convoyeur près de DP1. Nous pouvons maintenant déplacer la palette virtuelle identifiée de la file d'attente 1 à la file d'attente 2 et elle entrera automatiquement dans le convoyeur et se déplacera vers DP1 où elle est arrêtée. Une fois que le RFID = 0, cela signifie que la palette réelle a été libérée, nous pouvons donc libérer la palette dans le modèle.

Une autre file d'attente (File d'attente 3) est ajoutée et connectée à DP2 pour gérer la synchronisation de la palette dans DP 2 de la même manière que nous l'avons fait avec DP1. Une fois que la palette arrive à DP2, si la palette virtuelle arrive avant la palette réelle, elle est automatiquement arrêtée, attendant un message de la RFID 2 pour être libérée. Sinon, si la palette réelle arrive plus tôt, la palette virtuelle est transportée vers DP2. En option supplémentaire, les heures d'arrivée virtuelles et réelles peuvent être enregistrées dans un tableau afin de garder une trace de la différence entre le système physique et le JN pour une calibration ultérieure du modèle ou un traitement des données.

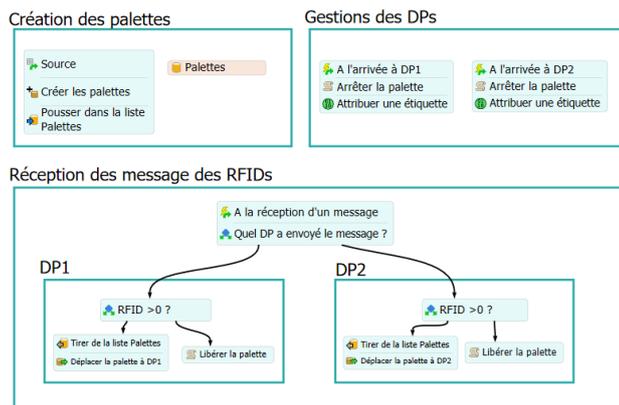


Figure 4. Process flow du mécanisme de synchronisation

## 5. DISCUSSION

La synchronisation et la connexion en temps réel du JN ont longtemps été discutées dans la littérature en raison des différents enjeux qu'elles représentent pour l'efficacité du JN dans l'accomplissement de ses services. Lorsque l'on évoque la synchronisation du JN, il est presque inévitable de mentionner la fréquence d'acquisition et d'échange des données également appelée "fréquence de mise à jour". Cette fréquence, où les changements de l'état physique sont mis à jour dans la représentation virtuelle de manière quasi instantanée, est généralement qualifiée de temps réel dans la littérature [19]. Cependant, la notion de "temps réel" est généralement déterminée par l'intervalle de décision, qui est défini comme la durée pendant laquelle une décision doit être prise. Lorsqu'il s'agit d'une prise de décision opérationnelle, l'intervalle de décision peut varier de quelques secondes à quelques minutes, mais lorsqu'il s'agit de la gestion de l'intégrité des actifs, il peut varier de plusieurs mois à plusieurs années. Étant donné les différentes exigences de fréquence des données de l'humain dans la boucle, il est souvent peu pratique d'établir un JN selon ce critère. Ainsi, la notion d'acquisition de données "en temps réel" est discutable car elle dépend du contexte de l'utilisateur et de l'intervalle de décision [20]. Il pourrait être plus intéressant d'avoir différentes stratégies de synchronisation et de mise à jour en fonction du niveau

de complexité des exigences du système. Un autre enjeu critique de la synchronisation, dans un contexte stochastique où nous avons un manque de connaissance du système physique engendrant des incertitudes épistémiques dans le modèle, le JN dans ce cas, va essayer d'approximer le comportement du système physique à travers une distribution de probabilité. Par conséquent, le mécanisme de synchronisation doit être robuste et s'adapter aux changements captés a posteriori, c'est-à-dire après qu'un événement se soit produit pour caler l'approximation et rester précis.

## 6. CONCLUSION

Le JN a suscité beaucoup d'intérêt dans les milieux académique et industriel en raison de sa capacité à être mis à jour en temps réel avec le système physique, notamment dans le domaine de la production. Cependant, la synchronisation en temps réel n'est pas toujours triviale en raison des caractéristiques inhérentes au système telles que l'incertitude, la nature stochastique, les événements inattendus et les diverses entités qui génèrent des données en permanence au même moment. Des recherches antérieures ont été menées pour surmonter ce challenge dans la production. Néanmoins, un manque d'intérêt a été remarqué dans la littérature au niveau du terrain pour un mécanisme de synchronisation générique. Ce travail propose un mécanisme de synchronisation au niveau du terrain du système réel avec le JN démontré avec un RP. Une application en laboratoire sur une chaîne de montage est présentée comme preuve de concept. Les résultats atteignent l'objectif déclaré de l'article : un JN synchronisé avec précision avec le champ d'un système de production en temps réel. Enfin, l'article ouvre de nouvelles perspectives de recherche pour le paradigme JN. Des potentiels élevés résident dans l'adoption de différentes stratégies de synchronisation et de taux de mise à jour en fonction du niveau d'exigence du système, de l'intervalle de décision et des cas d'utilisation. D'autres travaux peuvent être menés en comparant le comportement réel du système physique et le comportement nominal du JN après le processus de synchronisation afin d'évaluer la précision du modèle JN et d'assurer sa fiabilité dans la phase de validation de ce dernier ou d'évaluer la santé du système physique une fois le JN déployé avec succès.

## REFERENCES

- [1] C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, et M. Dassisti, « Digital twin paradigm: A systematic literature review », *Computers in Industry*, vol. 130, p. 103469, sept. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
- [2] T. Escobet, A. Bregon, B. Pulido, et V. Puig, Éd., *Fault Diagnosis of Dynamic Systems: Quantitative and Qualitative Approaches*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-17728-7.
- [3] F. Abdoune, O. Cardin, M. Nouiri, et P. Castagna, « About Perfection of Digital Twin Models », in *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, Cham, 2022, p. 91- 101. doi: 10.1007/978-3-030-99108-1\_7.

- [4] K. Efthymiou, A. Pagoropoulos, N. Papakostas, D. Mourtzis, et G. Chryssolouris, « Manufacturing Systems Complexity Review: Challenges and Outlook », *Procedia CIRP*, vol. 3, p. 644- 649, janv. 2012, doi: 10.1016/j.procir.2012.07.110.
- [5] M. Mashaly, « Connecting the Twins: A Review on Digital Twin Technology & its Networking Requirements », *Procedia Computer Science*, vol. 184, p. 299- 305, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.03.039.
- [6] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo, et K. D. Bettenhausen, « About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing », *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n° 3, p. 567- 572, janv. 2015.
- [7] B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, et S. Wartzack, « Shaping the digital twin for design and production engineering », *CIRP Annals*, vol. 66, n° 1, p. 141- 144, janv. 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.040.
- [8] H. Zipper et C. Diedrich, « Synchronization of Industrial Plant and Digital Twin », in *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Zaragoza, Spain, sept. 2019, p. 1678- 1681. doi: 10.1109/ETFA.2019.8868994.
- [9] B. A. Talkhestani, N. Jazdi, W. Schloegl, et M. Weyrich, « Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points », *Procedia CIRP*, vol. 72, p. 159- 164, janv. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.166.
- [10] Y. H. Pan, T. Qu, N. Q. Wu, M. Khalgui, et G. Q. Huang, « Digital Twin Based Real-time Production Logistics Synchronization System in a Multi-level Computing Architecture », *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, p. 246- 260, janv. 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.10.015.
- [11] Y. H. Pan, N. Q. Wu, T. Qu, P. Z. Li, K. Zhang, et H. F. Guo, « Digital-twin-driven production logistics synchronization system for vehicle routing problems with pick-up and delivery in industrial park », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 34, n° 7- 8, p. 814- 828, août 2021, doi: 10.1080/0951192X.2020.1829059.
- [12] E. Negri, V. Pandhare, L. Cattaneo, J. Singh, M. Macchi, et J. Lee, « Field-synchronized Digital Twin framework for production scheduling with uncertainty », *J Intell Manuf*, vol. 32, n° 4, p. 1207- 1228, avr. 2021, doi: 10.1007/s10845-020-01685-9.
- [13] V. Kuts *et al.*, « Synchronizing physical factory and its digital twin through an IIoT middleware: a case study », *Proc. Estonian Acad. Sci.*, vol. 68, n° 4, p. 364, 2019, doi: 10.3176/proc.2019.4.03.
- [14] D. Guo, R. Y. Zhong, Y. Rong, et G. G. Q. Huang, « Synchronization of Shop-Floor Logistics and Manufacturing Under IIoT and Digital Twin-Enabled Graduation Intelligent Manufacturing System », *IEEE Trans. Cybern.*, p. 1- 12, 2021, doi: 10.1109/TCYB.2021.3108546.
- [15] D. Schnürer, F. Hammelmüller, H. J. Holl, et W. Kunze, « Offline digital twin synchronization using measurement data and machine learning methods », *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, p. 2416- 2420, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.566.
- [16] Y. Jiang *et al.*, « Digital twin-enabled real-time synchronization for planning, scheduling, and execution in precast on-site assembly », *Automation in Construction*, vol. 141, p. 104397, sept. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104397.
- [17] H. Li *et al.*, « Data-driven hybrid petri-net based energy consumption behaviour modelling for digital twin of energy-efficient manufacturing system », *Energy*, vol. 239, p. 122178, janv. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122178.
- [18] O. Cardin, « Contribution à la conception, l'évaluation et l'implémentation de systèmes de production cyber-physiques », thesis, Université de Nantes, 2016. Consulté le: 20 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01443318>
- [19] M. Abramovici, J. C. Göbel, et P. Savarino, « Reconfiguration of smart products during their use phase based on virtual product twins », *CIRP Annals*, vol. 66, n° 1, p. 165- 168, janv. 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.042.
- [20] E. VanDerHorn et S. Mahadevan, « Digital Twin: Generalization, characterization and implementation », *Decision Support Systems*, vol. 145, p. 113524, juin 2021, doi: 10.1016/j.dss.2021.113524.

# Modèle à base d'intervalle pour la quantification de l'incertitude de la consommation d'énergie dans un jumeau numérique

Farah Abdoune <sup>a, b</sup>, Maroua Nouri <sup>a, b</sup>, Olivier Cardin <sup>a, b</sup> \*

<sup>a</sup> Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes, France

<sup>b</sup> IUT de Nantes, S.Mart Pays-de-Loire, 2 avenue du Pr J. Rouxel, 44470 Carquefou, France

\* e-mail : Olivier.cardin@univ-nantes.fr

## 1. INTRODUCTION

Une nouvelle technologie essentielle pour la transformation numérique et les mises à jour intelligentes est le jumeau numérique (JN). Le JN peut effectuer la surveillance, la modélisation, la prédiction, l'optimisation et d'autres tâches grâce à l'utilisation de données et de modèles. Le fondement d'une représentation précise de l'entité physique, qui permet au JN de fournir des services fonctionnels et de répondre aux exigences des applications, est spécifiquement la modélisation du JN [1]. Bien que le modèle soit un composant crucial du JN et une exigence pour des applications JN réussies, le JN a évolué de la recherche théorique à la mise en œuvre pratique. Le modèle de JN peut être défini en quatre dimensions de modèle dans l'espace virtuel, sur la base des attributs de l'entité physique : géométrie, physique, comportement et règle[2].

Le modèle comportemental est construit pour décrire les activités séquentielles, simultanées, connectées, périodiques et aléatoires des entités physiques [3]. L'exactitude du contrôle du modèle JN est déterminée par un modèle comportemental précis. Dans la plupart des cas, lorsque le JN est utilisé pour le contrôle, le modèle représente le comportement nominal du système. Le comportement réel du système est alors comparé au comportement nominal pour détecter toute déviation par rapport à la condition acceptable. La comparaison se fait entre une observation du système et une estimation de la densité de probabilité basée sur le modèle ou d'autres méthodes. Cette approche est acceptable lorsque le système surveillé est stable. Cependant, les entités physiques sont soumises à

diverses incertitudes dans leur fonctionnement pratique et, par conséquent, les modèles comportementaux ont tendance à être incohérents. La figure 1 donne un exemple de la variabilité d'un système complexe du monde réel, dans ce cas, une voiture. Les données vibro-acoustiques expérimentales de 20 voitures de type identique sont présentées dans la figure 1 [4]. Pour le bruit interne provoqué par les excitations du moteur délivrées à la structure, chaque courbe montre le graphique du module de la fonction de réponse en fréquence observée. Le module en dBA est l'axe vertical. La fréquence du moteur, mesurée en rotations par minute, est sur l'axe horizontal. Les variations importantes que l'on peut observer résultent à la fois des variations inhérentes au processus de production et de quelques variations mineures dans les configurations des 20 voitures. Dans ce cas, le modèle comportemental traditionnel du JN devient quelque peu imparfait en raison de ces incertitudes. Cette incertitude peut généralement être limitée et incluse dans le modèle, en particulier dans le cas de la surveillance et de la détection des anomalies, où le modèle nominal doit prendre en compte cette variabilité et être capable de la séparer des véritables anomalies survenant dans le système.

Un modèle robuste est un modèle qui peut tolérer l'incertitude. L'une des familles de méthodologies les plus avancées, dite active, est centrée sur la création de résidus qui sont simultanément sensibles aux anomalies et insensibles à l'incertitude. La technique passive, quant à elle, propage l'incertitude aux résidus et crée un seuil adaptatif pour améliorer la robustesse du système de détection des anomalies à l'étape de la prise de décision. La stratégie passive sera abordée dans cet article lorsque

le modèle nominal est considéré avec l'incertitude autour de chaque paramètre avec des limites d'intervalle. Les modèles d'intervalle (MI) sont une classe de modèles qui sont fournis par ce type de modélisation de l'incertitude. L'utilisation de modèles d'intervalle est désignée par différents noms selon le domaine d'application : analyse de tolérance [5] dans l'analyse de circuit, set-membership dans le contrôle automatisé (également connu sous le nom de méthode d'erreur limitée) [6], et semi-quantitatif dans le raisonnement qualitatif.

Dans cette étude, le modèle d'intervalle doit être livré avec un modèle nominal calibré et son erreur de modélisation sous forme d'intervalle. Notre attention sera attirée sur la manière dont le modèle de JN est calibré pour s'adapter aux données réelles (expérimentales) obtenues à partir du système surveillé dans des conditions saines. Cela signifie qu'au lieu de comparer l'observation mesurée avec une seule observation la mieux estimée de JN, une estimation concernant la plage de distribution de la sortie souhaitée est donnée par un intervalle pour mesurer l'incertitude autour du modèle. Compte tenu du coût de calcul pour résoudre les modèles d'optimisation pour définir les intervalles, nous avons l'intention de définir un modèle JN d'intervalle basé sur des données expérimentales en utilisant une approche statistique. Une étude de cas est présentée en se concentrant sur le comportement de consommation d'énergie d'un robot industriel en considérant la variabilité du processus et le bruit de mesure pour créer le modèle d'intervalle.

Le reste du document est organisé comme suit. La section 2 présente l'état de l'art, la section 3 décrit la méthodologie et la section 4 présente l'étude de cas. Enfin, la discussion et les conclusions sont présentées dans la section 5.

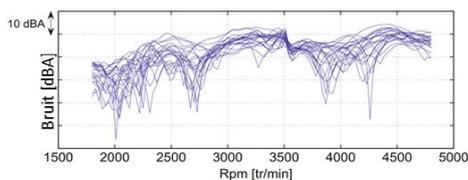


Figure 1. Mesures de la fonction de réponse en fréquence pour le bruit interne de 20 voitures induit par les excitations du moteur appliquées à la structure [Soize, 2017].

## 2. ETAT DE L'ART

La section suivante donne un aperçu de l'état de l'art pour (a) les méthodes de modélisation de la consommation d'énergie, (b) les modèles d'intervalle, et (c) le jumeau numérique et la quantification de l'incertitude.

### 2.1. Modélisation de la consommation d'énergie

Au cours des dernières décennies, en raison de la consommation d'énergie importante et élevée nécessaire à la production de nombreux secteurs industriels, la production économe en énergie est apparue comme l'axe principal de la transition durable. La modélisation et la

prévision de la consommation d'énergie sont indispensables pour les tâches liées à l'efficacité énergétique comme la planification, la gestion et l'optimisation dans le secteur manufacturier [7]. Sur la base de règles physiques, plusieurs études ont été réalisées pour prédire la quantité d'énergie dont les machines-outils auront besoin. Les modèles basés sur la physique caractérisent le comportement de consommation d'énergie en utilisant des principes physiques et une connaissance approfondie des machines-outils. Afin de déterminer la quantité d'énergie utilisée dans les processus de fraisage, [8] a fourni un modèle mécaniste basé sur les mécanismes actifs de conversion de l'énergie. En se basant sur la détermination du moment d'inertie du système d'entraînement de la broche, [9] ont prédit la consommation d'énergie de l'accélération de la broche des tours à commande numérique par ordinateur (CNC). Les modèles énergétiques basés sur les données ont montré des résultats dans l'identification des modèles de consommation d'énergie et la prédiction des conditions de consommation d'énergie. [10] ont construit une fonction de prédiction de l'énergie pour les machines-outils avec une contrainte de confiance en utilisant les techniques guidées par les données basées sur le processus gaussien. En utilisant une approche de gradient basée sur les arbres, [11] ont construit un modèle de prédiction énergétique piloté par les données en incluant la mécanique des processus pour une énergie de coupe particulière.

### 2.2. Modèles d'intervalle

Les modèles d'intervalle sont connus comme un modèle nominal plus l'incertitude sur chaque paramètre contraint par l'intervalle. Dans ce contexte, la détection des défauts se fait en comparant la réponse mesurée du système surveillé à un ensemble de réponses du modèle qui peuvent être obtenues en modifiant les paramètres incertains dans leurs intervalles. Cette méthode est également appelée " erreur limite ou technique d'appartenance à un ensemble " dans la communauté de la détection des défauts où elle a été récemment appliquée par un grand nombre de chercheurs [12]. Par exemple, dans cette étude [13], une méthode basée sur les données, incluant les angles d'attaque et de dérapage de la vitesse de l'air, est proposée pour une détection fiable des défauts des capteurs de données de l'air. Afin de quantifier la réponse non linéaire nominale dans les différentes phases de vol, un modèle de réseau neuronal non linéaire dans le paramètre a été construit. L'incertitude du modèle est capturée par une contribution supplémentaire additive d'un modèle d'intervalle linéaire dans les paramètres. Une autre étude a utilisé le modèle flou d'intervalle pour détecter les défauts dans les systèmes non linéaires avec des paramètres de type intervalle inconnus par [14]. Une bande de confiance pour les données d'entrée-sortie reçues pendant le fonctionnement normal du système est calculée à l'aide d'un modèle flou avec des paramètres d'intervalle.

Trois caractéristiques différentes de l'approche de détection de défauts basée sur les intervalles peuvent être définies : la simulation, la prédiction et l'observation [15]. La simulation par intervalle consiste à entourer, à l'aide d'un intervalle, l'ensemble des réponses de sortie prédites possibles en tenant compte de l'incertitude paramétrique. Un modèle de simulation d'intervalle d'ordre général nécessite la résolution de problèmes d'optimisation [16]. Dans la prédiction par intervalle, un modèle est souvent créé en choisissant une structure de modèle paramétrique, puis en estimant les paramètres du modèle à l'aide des données disponibles. La sortie future du système peut être prédite en utilisant le modèle qui a été ainsi obtenu. Fournir un intervalle de prédiction autour de la valeur prédite, à laquelle la sortie future est assurée d'appartenir avec une probabilité spécifique, par opposition à une valeur prédite unique compte tenu des incertitudes, est la principale caractéristique des modèles de prédiction d'intervalle [17]. Contrairement aux observateurs classiques, qui ne fournissent qu'une seule sortie nominale, les observateurs d'intervalle estiment les solutions d'un système en présence de diverses formes de perturbations à travers deux sorties qui fournissent une limite supérieure et inférieure sur les solutions [18].

### 2.3. Jumeau numérique et quantification de l'incertitude

Comme les systèmes complexes présentent un comportement stochastique, l'incertitude devrait être un aspect majeur de la modélisation du JN. La mesure de l'incertitude dans les mondes réel et informatique est connue sous le nom de quantification de l'incertitude (QI) [4]. La nécessité de l'QI est soulignée dans la littérature sur le JN [19]. Par exemple, en recueillant et en évaluant la quantité de changements de température anormaux provenant des mauvais comportements du générateur physique et en supprimant les comportements anormaux du modèle jumeau numérique du générateur, [20] a créé un modèle comportemental plus précis. En raison des différences de propriétés des matériaux, de l'historique des missions, de la variabilité des pilotes et d'autres facteurs, l'état de santé structurel d'un aéronef est connu pour varier d'un aéronef à l'autre. [21] utilisent l'idée des réseaux bayésiens dynamiques pour créer un modèle de surveillance de la santé permettant de diagnostiquer et de prédire l'avenir de chaque aéronef. Un modèle d'avion JN probabiliste est créé pour intégrer plusieurs sources d'incertitude au cours de la vie de l'aile de l'avion et réduire l'incertitude des paramètres du modèle. Afin de traiter les variations géométriques dans la conception légère d'assemblages de matériaux composites, un JN a été développé par [22] basé sur la simulation pour générer un méta-modèle de variabilité. Le JN peut prévoir les composants de production et, éventuellement, le produit assemblé. Si celui-ci diffère des exigences de conception prévues, la représentation virtuelle peut identifier les changements nécessaires.

## 2.4. Conclusions et objectif de recherche

Selon la littérature examinée, il manque clairement des approches de modélisation appropriées du jumeau numérique qui prennent en compte l'incertitude dans le modèle. Plusieurs articles tendent à mesurer l'incertitude en utilisant des distributions de probabilité lorsque l'incertitude concerne un paramètre ou une variable du système. Cependant, au lieu d'une estimation unique du comportement du système, la nécessité de définir une gamme de sorties possibles du système pour quantifier les incertitudes dans le modèle JN pour les systèmes dynamiques est d'une importance capitale. Par conséquent, cet article se propose d'emprunter l'approche du modèle d'intervalle à la littérature sur la détection des fautes et de l'appliquer pour créer un modèle JN de consommation d'énergie tenant compte de la variabilité du processus d'un robot industriel basé sur des données expérimentales.

## 3. METHODOLOGIE

Cette section présente la méthodologie pour fournir le modèle d'intervalle basé sur le JN en tenant compte des sources d'incertitude. L'objectif est d'inclure tous les comportements sains d'un système dynamique linéaire ou non linéaire à temps continue, surveillé dans l'intervalle. Par conséquent, différentes répliques du même processus sont nécessaires pour réaliser cette approche. Plus nous avons de répliques à notre disposition, plus le résultat obtenu est précis. Nous pourrions nous référer aux techniques de simulation qui nécessitent généralement 30 répliques dans le cas idéal. Cependant dans le cadre de cette étude, obtenir 30 répliques peut être coûteux, nous nous limiterons alors à 5 répliques. Un défaut est détecté lorsqu'il se trouve en dehors de l'enveloppe extérieure estimée.

### 3.1. Description du système

Considérons un système dynamique qui peut être caractérisé par la relation entrée-sortie suivante, étendue aux erreurs, aux perturbations et au bruit comme dans [15] :

$$y(k) = M(q)u(k) + \varepsilon(\theta) = \frac{V(q)}{W(q)}u(k) + \varepsilon(\theta) \quad (1)$$

où  $u(k)$  est l'entrée,  $y(k)$  est la sortie, et  $M(q)$  est la fonction de transfert avec  $V(q)$  comme numérateur et  $W(q)$  comme dénominateur, en termes de l'opérateur  $q$  classique.  $\varepsilon(\theta)$  représente l'incertitude du système.

Pour certaines des raisons énumérées ci-dessus, il y a toujours des incertitudes dans les paramètres du modèle du système réel, soit à cause des erreurs du modèle, soit à cause de la variabilité du processus réel. Par conséquent, le modèle du système sain devrait inclure un vecteur de paramètres incertains appelé  $\theta \in [\theta]$ , où  $[\theta]$  est un intervalle. Cet intervalle devrait contenir toutes les valeurs potentielles de  $\theta$  lorsque le système fonctionne normalement.

### 3.2. Détection de fautes résiduelles

La détection des défauts basée sur un modèle fonctionne en déterminant si l'entrée et la sortie mesurées du système sont conformes au comportement prédit par un modèle d'un système non défectueux. L'existence d'un défaut est démontrée si les mesures ne correspondent pas au modèle du système sain. La différence entre la sortie réelle et la sortie estimée est appelée résidu. Ce résidu doit être nul lorsque le système fonctionne normalement et doit s'écarter de zéro lorsqu'un problème survient dans le système. Le résidu  $r(k)$  fournit souvent la description suivante de la comparaison entre le comportement prédit  $y'(k)$  et le comportement réel  $y(k)$  comme dans [12] :

$$r(k) = y(k) - y'(k) \quad (2)$$

Cependant, les résidus deviennent non nuls en présence de perturbations, de bruit et d'erreurs de modélisation, ce qui rend difficile une modélisation précise.

### 3.3. Identification des intervalles

Le modèle doit être robuste et prendre en compte les incertitudes. Pour cette raison, un modèle d'intervalle est choisi dans cette étude pour modéliser le système dynamique. Pour ce faire, la sortie attendue est caractérisée par un ensemble qui peut être délimité par un intervalle  $[y'(k)]$  à n'importe quelle étape :

$$y'(k) \in [\underline{y}'(k); \bar{y}'(k)] \quad (3)$$

où les limites sont généralement déterminées en résolvant les deux problèmes d'optimisation ci-dessous :

$$\underline{y}'(k) = \min_{\theta \in [\underline{\theta}, \bar{\theta}]} y'(k) \quad (4)$$

$$\bar{y}'(k) = \max_{\theta \in [\underline{\theta}, \bar{\theta}]} y'(k) \quad (5)$$

Le test de détection des défauts est donc basé sur la propagation de l'incertitude des paramètres au résidu et sur la détermination de la présence ou non de la condition suivante :

$$y(k) \in [y'(k)] \quad (6)$$

Dans le cadre de cette étude et afin d'éviter les coûts de calcul pour résoudre les problèmes d'optimisation, la définition de l'intervalle sera effectuée selon une approche empirique à partir des données expérimentales. Plusieurs répliques du même processus sont mesurées et collectées à partir du système surveillé. Compte tenu de la variabilité entre les répliques, le minimum et le maximum sont définis pour chaque point afin de définir l'enveloppe inférieure et supérieure. Ensuite, pour lisser les signaux obtenus, une transformation de Hilbert (HT) est effectuée sur ceux-ci. La transformée de Hilbert est un opérateur linéaire spécial utilisé pour analyser les vibrations linéaires et non linéaires. Elle prend une fonction variable réelle  $u(t)$  et produit une autre fonction variable réelle  $H(u(t))$  permettant de faire une transformation linéaire

qui permet d'étendre un signal réel dans le domaine complexe. La transformée de Hilbert d'un signal  $u(t)$  est donnée comme dans (Feldman, 2011) par :

$$H(u(t)) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(t+\tau) - u(t-\tau)}{\tau} d\tau \quad (7)$$

### 3.4. Fonction de perte

La transformation de Hilbert discrétise le signal initial. Par conséquent, l'enveloppe définie (c'est-à-dire l'intervalle) doit prendre un minimum de points à discrétiser et en même temps inclure tous les points ou autant de points que possible des répliques variables. Pour évaluer l'efficacité de l'enveloppe, la fonction suivante est développée pour mesurer le pourcentage d'erreur qui doit être minimisé :

$$e = \frac{A_1 - A_2}{A_1} * 100 \quad (8)$$

Où  $A_1$  est la zone couverte par les courbes estimées avec l'enveloppe de la transformation de Hilbert et  $A_2$  est la zone couverte par les courbes minimales et maximales calculées détaillées dans l'étude de cas.

## 4. ETUDE DE CAS

Cette section présente une étude de cas basée sur des données expérimentales de mesures de la consommation d'énergie d'un robot industriel afin d'évaluer l'efficacité de la méthodologie proposée.

### 4.1. Cadre expérimental

Dans ce travail, une enquête expérimentale a été menée à l'aide d'une unité de mesure capable de mesurer le comportement électrique d'un robot industriel pendant son fonctionnement. La figure 2 représente le robot industriel Kuka KR 10 et le contrôleur KR C4 qui ont été utilisés pour l'expérience. Avec une fréquence d'échantillonnage de 12 ms, le courant électrique instantané (A) a été mesuré directement avec le contrôleur. Comme le robot est entraîné par le courant et fonctionne en courant continu, la puissance peut être calculée comme  $V \cdot I$ , où  $V$  a été déterminé comme étant constant et égal à 48 V. La consommation d'énergie est facilement calculée en intégrant la consommation de puissance.



Figure 2. Robot industriel Kuka KR10

## 4.2. Prétraitement des données

Les données expérimentales doivent d'abord être prétraitées et nettoyées. Pour réduire le bruit, un filtrage a été effectué à l'aide d'un filtre passe-bas qui ne laisse passer que les signaux basse fréquence. La figure 3 illustre les séries temporelles de la consommation électrique des cinq répliques pour la même expérience. Le robot fonctionnait à 20% de sa vitesse maximale sans charge utile. L'axe horizontal représente le temps en secondes (s) et l'axe vertical représente la puissance en watt.

Les répliques R(i) sont ensuite coupées séparément et resynchronisées au temps=0 pour visualiser la variabilité entre elles comme le montre la Figure 4. Une variation significative peut être observée entre les différentes répliques, résultant de la variabilité inhérente au processus de production et du bruit de mesure.

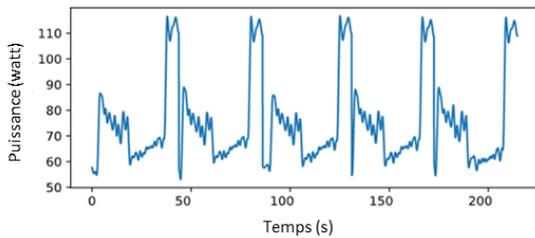


Figure 3. Consommation d'énergie du robot à 20% de sa vitesse maximale sans charge utile

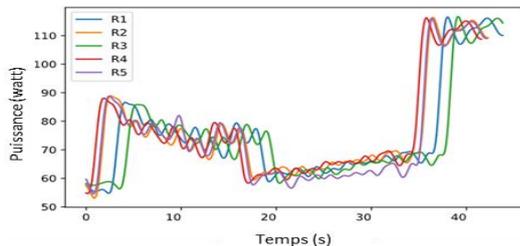


Figure 4. Variabilité entre les différentes répliques

## 4.3. Identification du modèle d'intervalle

Dans cette étape, nous entendons définir le modèle d'intervalle considéré comme le modèle nominal intégrant les incertitudes du processus réel. Ce modèle d'intervalle est intégré dans le modèle JN. A partir des cinq répliques, les points minimum et maximum de chaque étape sont calculés pour identifier ensuite les enveloppes supérieure et inférieure du signal de consommation électrique. La figure 5 illustre les signaux obtenus.

Une transformation de Hilbert est ensuite effectuée sur le signal minimum et maximum, comme illustré à la figure La HT donne le signal analytique des courbes précédentes en obtenant la réponse en phase minimale à partir d'une analyse spectrale.

Le pourcentage d'erreur  $e$  est calculée pour choisir l'enveloppe correcte en se basant sur la zone couverte par les bornes inférieures et supérieures de la

transformée d'Hilbert et la zone couverte par le minimum et la maximum dans la figure 6. Les paramètres de la transformée de Hilbert sont calibrés pour trouver un compromis permettant de couvrir tous les points. L'enveloppe choisie présente une erreur de 10,23%, ce qui est satisfaisant au vu de la figure 7 où toutes les répliques ont été encapsulées avec succès.

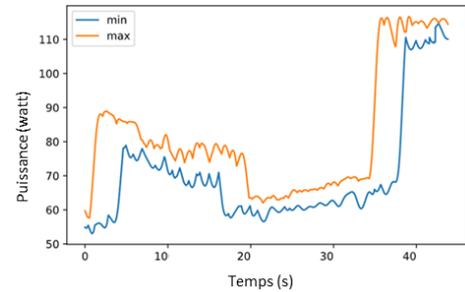


Figure 5. Définition des courbes minimale et maximale

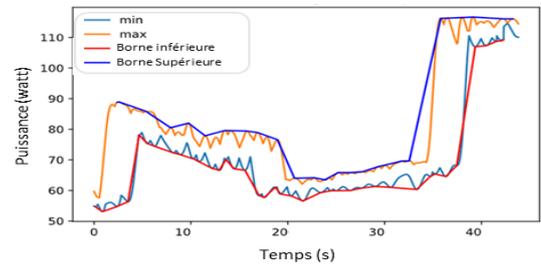


Figure 6. Définition de l'intervalle avec HT

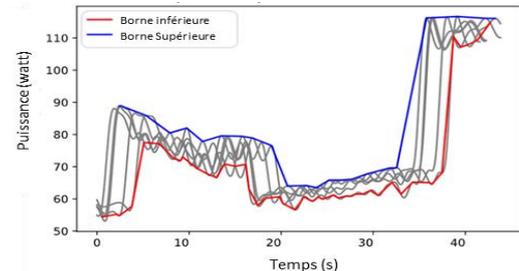


Figure 7. Encapsulation des répliques à l'intérieur du modèle d'intervalle défini

Le modèle d'intervalle obtenu permet d'examiner la cohérence entre le comportement de consommation d'énergie observé du robot et le comportement attendu défini comme une gamme de sorties possibles par l'intervalle. Un défaut peut être indiqué lorsqu'un comportement n'est pas encapsulé dans l'enveloppe.

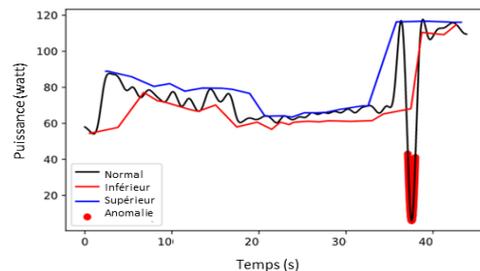


Figure 8. Illustration de la détection d'anomalie utilisant le modèle d'intervalle défini

## CONCLUSION

Le jumeau numérique a suscité un grand intérêt dans les sphères scientifiques et industrielles en raison de sa capacité à être mis à jour en temps réel. Les études actuelles sur la modélisation des jumeaux numériques n'en sont encore qu'aux premiers stades de leur croissance rapide. Cependant, de nombreux impératifs doivent être pris en compte afin d'améliorer la capacité de la modélisation des jumeaux numériques à représenter les modèles de jumeaux numériques et à améliorer leur praticabilité. L'incertitude devrait jouer un rôle important dans la modélisation du JN puisque les systèmes complexes présentent généralement un comportement stochastique. Cependant, de nombreuses études sur le JN ne tiennent pas compte de l'incertitude. L'implémentation d'un modèle JN capable de s'adapter à la variabilité et à l'incertitude du système physique reste donc une tâche importante. En conséquence, cet article présente une nouvelle approche pour construire un modèle JN en quantifiant l'incertitude au sein du modèle afin d'être plus robuste contre les perturbations externes, en utilisant une approche statistique couplée à la transformation de Hilbert pour identifier les enveloppes supérieure et inférieure de l'intervalle. Des résultats satisfaisants ont été obtenus lors de l'étude de cas élaborée sur la consommation d'énergie d'un robot industriel. La méthode présentée permet d'examiner la cohérence entre le comportement observé du système et le comportement attendu défini comme une gamme de sorties possibles par le modèle d'intervalle. Une anomalie est détectée lorsqu'un comportement n'est pas inclus dans l'intervalle défini. D'autres travaux de recherche peuvent porter sur l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique pour détecter les anomalies dans ce contexte ou sur le développement d'intervalles de prédiction avec la prévision de la consommation d'énergie pour mesurer l'incertitude autour d'une prévision.

## RÉFÉRENCES

- [1] F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, et P. Ji, « Digital twin modeling », *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, p. 372- 389, juill. 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.06.015.
- [2] F. Tao *et al.*, « Digital twin-driven product design framework », *International Journal of Production Research*, vol. 57, n° 12, p. 3935- 3953, juin 2019.
- [3] M. Grieves et J. Vickers, « Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems », in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, et A. Alves, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2017, p. 85- 113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4.
- [4] C. Soize, *Uncertainty Quantification: An Accelerated Course with Advanced Applications in Computational Engineering*, vol. 47. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-54339-0.
- [5] V. Puig, J. Saludes, et J. Quevedo, « Worst-Case Simulation of Discrete Linear Time-Invariant Interval Dynamic Systems », *Reliable Computing*, vol. 9, n° 4, p. 251- 290, août 2003, doi: 10.1023/A:1024666428387.
- [6] M. Milanese et C. Novara, « Set Membership identification of nonlinear systems », *Automatica*, vol. 40, n° 6, p. 957- 975, juin 2004, doi: 10.1016/j.automatica.2004.02.002.
- [7] Y. He, P. Wu, Y. Li, Y. Wang, F. Tao, et Y. Wang, « A generic energy prediction model of machine tools using deep learning algorithms », *Applied Energy*, vol. 275, p. 115402, oct. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115402.
- [8] R. Imani Asrai, S. T. Newman, et A. Nassehi, « A mechanistic model of energy consumption in milling », *International Journal of Production Research*, vol. 56, n° 1- 2, p. 642- 659, janv. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1404160.
- [9] J. Lv, R. Tang, W. Tang, Y. Liu, Y. Zhang, et S. Jia, « An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools », *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, p. 794- 803, févr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.045.
- [10] R. Bhinge, J. Park, K. H. Law, D. A. Dornfeld, M. Helu, et S. Rachuri, « Toward a Generalized Energy Prediction Model for Machine Tools », *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 139, n° 4, nov. 2016, doi: 10.1115/1.4034933.
- [11] Z. Liu et Y. Guo, « A hybrid approach to integrate machine learning and process mechanics for the prediction of specific cutting energy », *CIRP Annals*, vol. 67, n° 1, p. 57- 60, janv. 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.03.015.
- [12] T. Escobet, A. Bregon, B. Pulido, et V. Puig, Éd., *Fault Diagnosis of Dynamic Systems: Quantitative and Qualitative Approaches*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-17728-7.
- [13] M. L. Fravolini, M. R. Napolitano, G. D. Core, et U. Papa, « Experimental interval models for the robust Fault Detection of Aircraft Air Data Sensors », *Control Engineering Practice*, vol. 78, p. 196- 212, sept. 2018, doi: 10.1016/j.conengprac.2018.07.002.
- [14] S. Oblak, I. Škrjanc, et S. Blažič, « Fault detection for nonlinear systems with uncertain parameters based on the interval fuzzy model », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 20, n° 4, p. 503- 510, juin 2007, doi: 10.1016/j.engappai.2006.08.002.
- [15] V. Puig, J. Quevedo, T. Escobet, F. Nejari, et S. de las Heras, « Passive Robust Fault Detection of Dynamic Processes Using Interval Models », *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, n° 5, p. 1083- 1089, sept. 2008, doi: 10.1109/TCST.2007.906339.
- [16] J. Armengol, L. Travé-Massuyès, J. Vehí, et J. L. de la Rosa, « A survey on interval model simulators and their properties related to fault detection », *Annual Reviews in Control*, vol. 24, p. 31- 39, janv. 2000, doi: 10.1016/S1367-5788(00)90009-9.
- [17] K. Li, R. Wang, H. Lei, T. Zhang, Y. Liu, et X. Zheng, « Interval prediction of solar power using an Improved Bootstrap method », *Solar Energy*, vol. 159, p. 97- 112, janv. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.10.051.
- [18] F. Mazenc, T. N. Dinh, et S. I. Niculescu, « Interval observers for discrete-time systems », *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 24, n° 17, p. 2867- 2890, 2014, doi: 10.1002/rnc.3030.
- [19] C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, et M. Dassisti, « Digital twin paradigm: A systematic literature review », *Computers in Industry*, vol. 130, p. 103469, sept. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103469.
- [20] F. Boulfani, X. Gendre, A. Ruiz-Gazen, et M. Salvagnon, « Anomaly detection for aircraft electrical generator using machine learning in a functional data framework », in *2020 Global Congress on Electrical Engineering (GC-ElecEng)*, sept. 2020, p. 27- 32. doi: 10.23919/GC-ElecEng48342.2020.9285984.
- [21] C. Li, S. Mahadevan, Y. Ling, L. Wang, et S. Choe, « A dynamic Bayesian network approach for digital twin », in *19th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017. doi: 10.2514/6.2017-1566.
- [22] W. Polini et A. Corrado, « Digital twin of composite assembly manufacturing process », *International Journal of Production Research*, vol. 58, n° 17, p. 5238- 5252, sept. 2020, doi: 10.1080/00207543.2020.1714091.

# Détection automatique de contraintes cinématiques d'assemblages de modèles CAO

L. Vergez <sup>a,\*</sup>, A. Polette <sup>a</sup>, J-P. Pernot <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Arts et Métiers Institute of Technology, LISPEN, HESAM Université, F-13617 Aix-en-Provence, France

\* e-mail : lucas.vergez@ensam.eu

## 1. INTRODUCTION

Les assemblages CAO peuvent être de précieuses données afin de modéliser un système mécanique, d'effectuer des calculs d'éléments finis, d'améliorer la conception, et permettre une exploitation tout au long du cycle de vie du produit. Ils sont aussi indispensables dans les domaines de la réalité virtuelle ou de l'animation afin de modéliser des comportements mécaniques, et rendre plus réalistes les expériences immersives. Lorsqu'ils sont contraints, les assemblages permettent d'envisager de nombreuses applications et notamment lors des simulations de désassemblage / réassemblage. Dans le contexte de cet article, il s'agit de générer de nouveaux assemblages CAO pour faire de l'expansion de bases de données d'assemblages CAO.

De nos jours, dans un contexte où l'interopérabilité des données devient primordiale, il est essentiel de maîtriser le transfert de données par des standards [12] sans perte de données. Dans le domaine de la CAO, les fichiers standards STEP / IGES sont largement adoptés par la communauté, et la mise à disposition de modèles CAO sur les bases de données (BDD) en ligne [10] se font généralement par ce type de format. Le partage de ces données sur des BDD libres permet un gain de temps considérable, que ce soit dans le milieu industriel, du divertissement, ou domestique. Cependant, malgré la grande interopérabilité des formats standards, le principal défaut de la standardisation est la perte d'informations lors de la transformation [13]. En effet, le format STEP contient les informations géométriques des pièces définies dans leurs modèles B-Rep, mais pas la façon dont les pièces ont été créées (pas d'arbres de construction), ni les contraintes cinématiques entre les pièces, et toutes ces informations sont donc perdues lors du ré-import de pièces. La paramétrisation des modèles morts peut être retrouvée grâce aux techniques de modification de modèles non paramétrés [15].

Cependant, les contraintes cinématiques des assemblages CAO doivent être replacées à la main par l'utilisateur, ce qui peut vite devenir chronophage lorsque l'assemblage contient plusieurs centaines de pièces et liaisons.

Cet article introduit une méthode permettant de retrouver automatiquement les contraintes cinématiques d'assemblage depuis un assemblage STEP, à partir de la géométrie des pièces de l'assemblage, et de leurs placements relatifs. Ce type d'assemblage sera par la suite appelé « assemblage positionné ». Les assemblages ainsi reconstruits peuvent être par la suite utilisés pour de nombreuses applications, et la méthode développée peut permettre de corriger des erreurs d'assemblage et de tolérance. La principale contribution de ce papier est une méthode de détection de contraintes cinématiques sur des assemblages STEP.

L'article dressera dans un premier temps un état de l'art des méthodes de détection de contraintes cinématiques d'assemblages CAO. La méthode de détection et de simplification des contraintes sera par la suite détaillée en profondeur. Enfin, les résultats obtenus par l'approche proposée seront comparés à ceux obtenus manuellement par des concepteurs CAO.

## 2. ÉTAT DE L'ART

La problématique de détection de contraintes entre pièces d'un assemblage se retrouve dans différents domaines d'application comme la recherche d'assemblages ou de sous-assemblages dans de larges bases de données (BDD), et la prédiction de contraintes cinématiques. La recherche d'assemblages et de sous-assemblages est un domaine de recherche actif, en effet des méthodes efficaces sont indispensables afin de retrouver rapidement un assemblage, ou un sous-assemblage de pièces mécaniques dans une base de données. Comme exposé précédemment, les bases de

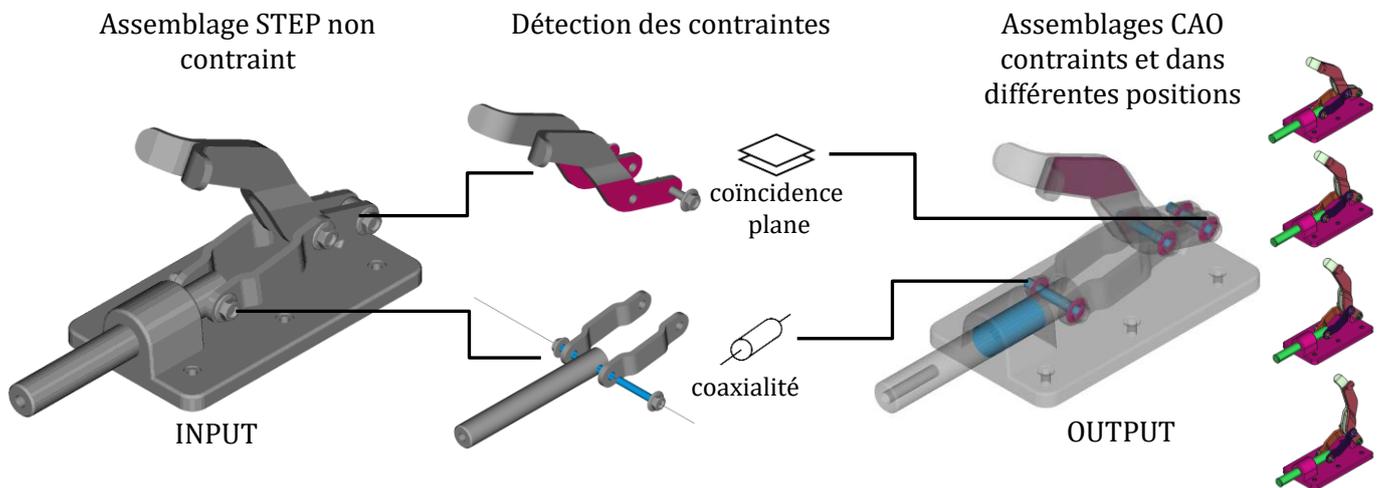


Figure 1 - Schéma global de la méthode de détection automatique de contraintes cinématiques

données d'assemblages CAO sont le plus souvent stockées sous la forme de fichiers standards (STEP / IGES) qui ne contiennent pas les informations des contraintes cinématiques entre les pièces. Il faut donc au préalable analyser ces assemblages afin d'en tirer des descripteurs (souvent sous forme de graphes) pour chaque pièce (ou sous-assemblage). Par exemple, Lupinetti et al. [2] ont discrétisé les faces dans les assemblages afin d'extraire un maximum d'informations avant de calculer les descripteurs. Cela permet une grande exhaustivité dans la détection d'interfaces car tout type de contact peut être détecté. Cependant, le temps de calcul nécessaire à la détection d'interfaces peut s'avérer long lorsque les surfaces sont des B-Splines avec plusieurs centaines de points de contrôle.

Les méthodes de détection d'interfaces sont largement utilisées pour la détermination de séquences d'assemblages [14], où il est primordial de bien caractériser l'assemblage avant de pouvoir déterminer une séquence de désassemblage sans interférences. Les liaisons étudiées dans ce domaine se limitent la plupart du temps aux contacts plans et cylindriques. Cela facilite l'analyse des degrés de liberté des pièces dans l'assemblage. Les contraintes détectées peuvent ensuite être simplifiées pour enlever les redondances de contraintes introduites par le trop grand nombre de contraintes détectées [3]. Pour cela il faut affiner le niveau de connaissance, et ainsi passer de faces en contact pour aller vers les mouvements cinématiques des pièces entre elles [4].

D'autres méthodes s'intéressent à la prédiction de contraintes entre deux pièces mécaniques. Jusqu'à présent, ces méthodes étaient majoritairement utilisées sur des maillages [6]. Ces méthodes ont subi une grande amélioration ces derniers temps avec l'arrivée du Machine Learning dans le domaine de la CAO [5]. Cela a notamment été rendu possible grâce à la publication d'une large BDD d'assemblages mécaniques contraints par Willis et al. [1]. Ces méthodes de réassemblage permettent la prise en compte d'une grande diversité de pièces, et ne se limitent pas aux assemblages positionnés.

La détection automatique de contraintes cinématique est souvent utilisée dans de nombreux domaines comme la recherche d'assemblage, la définition de séquences d'assemblage/désassemblage, ou l'analyse cinématique d'assemblages. Elle est cependant rarement formalisée et comparée à d'autres méthodes de détection. C'est pour lever ces verrous qu'une nouvelle méthode de détection de contraintes cinématiques est ici proposée et comparée.

### 3. DETECTION DES CONTRAINTES CINEMATQUES

L'algorithme de détection de contraintes s'appuie sur une méthode de création de graphes de liaisons [7], et permet la détection de contacts entre deux surfaces.

Dans cet article, nous nous limiterons au cas des contacts plans et cylindriques, même si la méthode reste applicable pour tout type de contact. En effet, l'analyse de la BDD Autodesk Gallery Dataset [1], montre que les contacts entre surfaces représentent 88 % de tous les types de contraintes cinématiques (contact, rigidité, révolution, glissière, etc.). Parmi tous les contacts possibles, les contacts plans et cylindriques représentent quant à eux 83 % de ceux habituellement ajoutés durant la conception. De plus, dans ce papier, nous ferons l'hypothèse que les contacts seront vérifiés sur les assemblages sources à une tolérance près. La prise en compte de cette tolérance sera discutée en section 3.2. Enfin, la méthode proposée ne travaille pas au niveau des sous-assemblages et toutes les pièces de l'assemblage sont placées sur le même niveau hiérarchique. D'autres méthodes permettent de retrouver ces sous-assemblages à partir d'assemblages contraints [11].

#### 3.1. Détection des contraintes

La détection des contacts plans et des contacts cylindriques est faite à partir de conditions entre deux faces de deux modèles B-Rep de l'assemblage. Ces conditions sont déterminées à l'avance par des règles métiers. Un prétraitement est effectué sur les faces de l'assemblage afin de limiter au maximum le nombre de

aires de faces à vérifier pendant la détection des contraintes. Une opération d'affinage des faces est ainsi effectuée au préalable sur toutes les pièces de l'assemblage afin de regrouper toutes les faces équivalentes du point de vue d'une contrainte. Deux faces

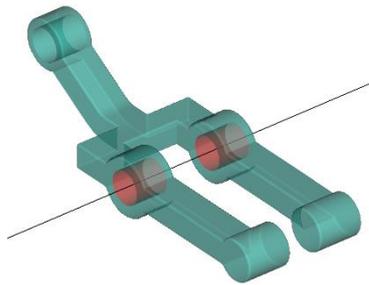


Figure 2 - Exemple de faces équivalentes du point de vue d'une contrainte coaxiale

sont équivalentes du point de vue d'une contrainte lorsque la contrainte peut être appliquée indifféremment aux deux faces. Par exemple, sur la figure 2, les deux faces rouges sont équivalentes vis-à-vis d'une contrainte coaxiale. Cette notion est proche de la notion de faces super-maximales introduite par Crozet et al. [8], à la différence près que deux faces super-maximales différentes peuvent être équivalentes vis-à-vis d'une même contrainte. Une fois que ce prétraitement effectué, les paires de faces qui ont des boîtes englobantes qui se chevauchent et qui appartiennent à deux solides différents sont étudiés.

Les 4 conditions à vérifier pour une contrainte contact cylindrique sont :

- Les deux faces sont cylindriques.
- Les orientations des deux faces sont opposées.
- Les axes des deux cylindres sont coaxiaux.
- Les rayons des deux cylindres sont égaux à une tolérance près.

Et les 4 conditions pour la détection d'une contrainte contact plan sont :

- Les deux faces sont planes.
- Les deux normales sont colinéaires.
- Les deux normales sont de direction opposée.
- Les deux faces se touchent à une tolérance près.

Lorsque ces conditions sont vérifiées sur une paire de faces, une contrainte est ajoutée à la pile de contraintes potentielles. Une fois que toutes les paires de faces ont été parcourues, les contraintes cinématiques redondantes entre deux mêmes pièces sont supprimées. Cette notion est approfondie en section 3.3.

### 3.2. Tolérances et qualité des modèles CAO

Les modèles CAO étant stockés à l'aide de nombres flottants dans la mémoire des ordinateurs, des tolérances doivent être introduites lors de leur analyse. Plus généralement, la façon de gérer ces écarts peut être étendue au cas des jeux introduits volontairement dans les modèles afin de représenter certaines solutions technologiques, comme le filetage d'une vis par exemple ou le montage de pièces frettée. Il est donc indispensable d'introduire la notion de tolérance lors de la détection de

contacts entre deux pièces. La tolérance acceptée lors de la détection des contacts peut être absolue ou relative aux rayons  $r_1$  et  $r_2$  dans le cas de détection de contact cylindrique. Les conditions de vérifications relatives et absolues  $C_r$  et  $C_a$  pour les contacts cylindriques sont exprimées sous la forme :

$$C_a : |r_1 - r_2| < \varepsilon_a \text{ et } C_r : \left| 1 - \frac{r_1}{r_2} \right| < \varepsilon_r$$

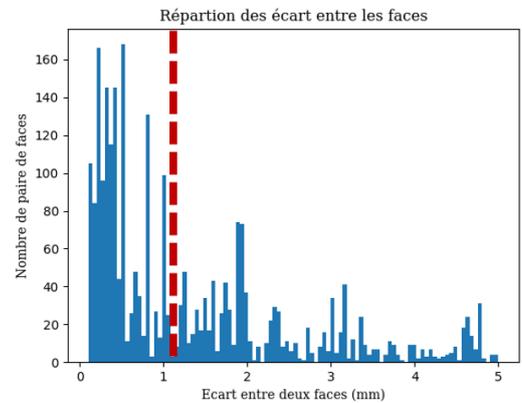


Figure 3 - Répartition des écarts entre les paires de faces cylindriques parcourues

Afin de régler correctement ces tolérances, nous avons analysé les valeurs sur  $|r_1 - r_2|$  une centaine d'assemblages de la BDD Assembly Dataset Gallery [1], et ceci afin de paramétrer  $\varepsilon$  sur la tranche de valeur la moins prise par les distances entre les faces cylindriques. Empiriquement, les rayons sont le plus souvent détectés lorsque  $\varepsilon_a \approx 1mm$  (figure 3). Pour la tolérance des distances entre les surfaces planes, la longueur à comparer à  $\varepsilon$  est la distance minimale entre les deux faces planes. Cette distance est très souvent égale à 0, car elle vaut 0 dès lors qu'une contrainte plane est ajoutée dans l'assemblage.

### 3.3. Contrainte minimale et simplification

Malgré le post-traitement effectué lors de la détection des contraintes cinématiques, il reste des redondances de contraintes cinématiques, qu'il n'y aurait pas eu si l'assemblage avait été parfaitement contraint.

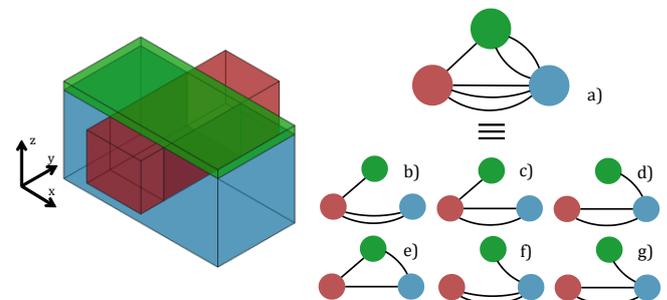


Figure 4- Redondance de contrainte générée par la méthode

La figure 4 présente la redondance de contrainte générée par la méthode sur un exemple académique. En effet, 3 contacts plans sur les 6 détectés suffisent à contraindre complètement l'assemblage. Cette

redondance peut être détectée lorsque l'ajout d'une nouvelle contrainte n'enlève aucun degré de liberté à aucune pièce. Ces degrés de liberté peuvent être directement vérifiés cinématiquement dans l'atelier A2+ de FreeCAD. Nous pouvons alors définir cette contrainte comme implicite, et ne pas l'ajouter dans la hiérarchie du modèleur 3D. Cette redondance de contraintes génère une multiplicité de solutions possibles, ce qui rend dans tous les cas la solution potentiellement différente d'un assemblage créé manuellement par un utilisateur. C'est pourquoi il faut comparer les contraintes détectées au niveau des groupements cinématiques [3]. Plus le groupement cinématique est grand, plus la diversité de solutions possibles est importante. Une redondance de contrainte peut aussi être détectée entre deux pièces. Sur la figure 4, les deux contraintes planes verticales entre la pièce bleue et la pièce rouge sont redondantes, et une seule contrainte plane suffit à empêcher le déplacement selon x (les graphes b et c sont donc complètement équivalents). Une contrainte peut alors correspondre à un ensemble de contraintes cinématiques équivalentes (figure 2). Il n'y a plus une entité (point, arête ou face) contrainte avec une autre, mais un groupe d'entités équivalentes contraint avec un autre groupe d'entités. Une seule entité accueillera la contrainte effective malgré les contraintes implicites d'autres entités. Cette simplification permet notamment la gestion d'interfaces filetées entre deux pièces, puisqu'un filetage peut être représenté par plusieurs faces cylindriques. Toutes les faces de la vis seront contraintes à d'autres faces sur le filetage de l'écrou, chaque pièce aura un groupe d'entités contraint à l'autre, avec une seule face contrainte dans le modèleur 3D. Cela permet d'alléger le nombre de paramètres dans le solveur cinématique, et de simplifier l'assemblage contraint.

## 4. RESULTATS

### 4.1. Implémentation

La méthode implémentée dans un modèleur particulier permettrait seulement d'importer des assemblages sources dans un certain modèleur, ce qui ne réglerait pas le souci de l'interopérabilité des données entre différents modèleurs. Les données des contraintes détectées sont donc stockées dans un fichier JSON pouvant être lu par tous les logiciels d'assemblage CAO (FreeCAD, Inventor, 3DX, etc.) ainsi que dans certains logiciels de modélisation 3D (Unity, Blender, etc.). Lors de l'import de l'assemblage dans le modèleur, toutes les pièces sont importées une à une, puis une fonction est appliquée pour permettre la persistance des index des entités. En effet, la contrainte étant attachée à deux entités (qui peuvent être des faces, des arrêtes ou des points), il faut pouvoir retrouver ces entités lors du réimport de la pièce [9] : c'est le problème de persistance d'index qui n'est pas détaillé dans cet article. Dans un second temps, les contraintes sont ajoutées dans l'ordre de détection. Pour chaque contrainte ajoutée, une vérification de redondance est

faite, et une résolution cinématique peut être appliquée afin de corriger le modèle.

### 4.2. Comparaison sur un assemblage

Afin de valider l'approche proposée, une comparaison a été effectuée entre un assemblage généré à la main par plusieurs concepteurs CAO, le premier provenant des contraintes appliquées sur le modèle [1] et l'algorithme proposé. L'analyse approfondie a été faite sur le premier assemblage mécanique de la BDD de 750 assemblages.

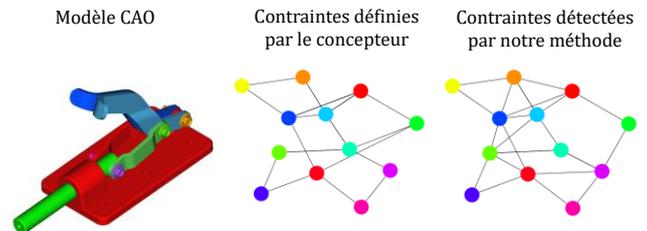


Figure 5 - Modèle CAO et ses deux graphes de liaisons (humain à gauche et détecté à droite)

Une pièce non contrainte a été enlevée de l'assemblage pour la visualisation du modèle figure 5. La méthode a été appliquée avec deux tolérances différentes pour montrer la différence de détection sur les contacts cylindriques. La comparaison des résultats par la suite a été faite avec  $\varepsilon=1\text{mm}$ . Comme indiqué dans le Tableau 1, les concepteurs ont utilisés différentes stratégies afin de contraindre cinématiquement l'assemblage.

Tableau 1 - Comparaison des contraintes définies par l'utilisateur et par la méthode

	Contacts plans	Contacts cylindriques	Contacts toriques	Total
Utilisateur 1	11	11	4	26
Utilisateur 2	10	14	0	24
Utilisateur 3	10	13	0	23
Utilisateur 4	4	6	6	16
Méthode ( $\varepsilon=0.5$ )	11	13	0	24
Méthode ( $\varepsilon=1$ )	11	14	0	25

Sur les 25 contraintes retrouvées ( $\varepsilon=1$ ), toutes permettent de contraindre l'assemblage. Les utilisateurs 1 et 4 ont utilisé des contacts toriques (équivalents à une liaison pivot) à la place de contact plan + contrainte coaxiale. Ce type de contact n'est pas encore pris en compte dans la méthode de détection présentée ici. Tous les utilisateurs ont 1, 2 ou 3 contraintes cinématiques manquantes, et l'utilisateur 1 possède deux contraintes redondantes. Sur cet exemple, la méthode de détection de contraintes cinématiques possède moins d'erreurs que la méthode manuelle, car le nombre de contraintes redondantes ou manquantes est beaucoup plus faible. De plus, les contraintes détectées par la méthode ont plus de sens technologique, car aucune contrainte coaxiale ne sera appliquée entre deux cylindres vides (trous), contrairement aux contraintes définies par le concepteur. Cependant, la comparaison est faite sur un assemblage

précis et ne permet pas à ce stade une validation complète de la méthode. Il n'existe pas aujourd'hui de BDD d'assemblages CAO parfaitement contraints afin de comparer notre méthode. En effet, les contraintes apposées par des utilisateurs peuvent souvent être erronées, et ne permettent pas d'obtenir de solution étalon.

### 4.3. Temps de calcul

L'algorithme de détection de contraintes a été implémenté en python et porté sur le logiciel FreeCAD. Le temps d'import de l'assemblage dans l'atelier A2+ (atelier d'assemblage FreeCAD le plus utilisé) avec toutes les contraintes cinématiques, pour un assemblage de machine à vapeur de 121 pièces (figure 6) avec 125 contraintes cinématiques détectées (Processeur 11th Gen Intel(R) Core(TM) i9-11950H @ 2.60GHz, 32 Go RAM) est de 56 secondes.

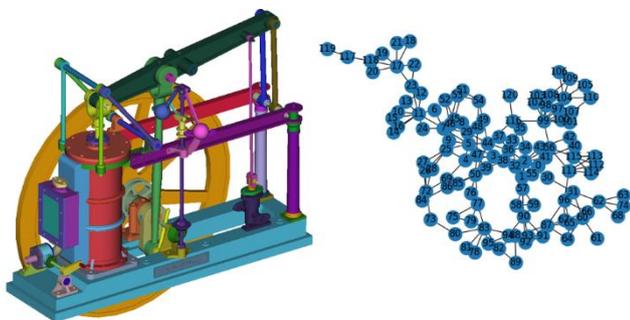


Figure 6 - Machine à vapeur et son graphe de liaisons détectées

L'import de l'assemblage et son prétraitement est de 15 secondes tandis que le calcul de détection de contraintes cinématiques est de 42 secondes. L'assemblage contient 2500 faces en tout. Ce test de rapidité a été élargi à 250 assemblages différents provenant de la BDD Gallery Dataset [1], et les différents

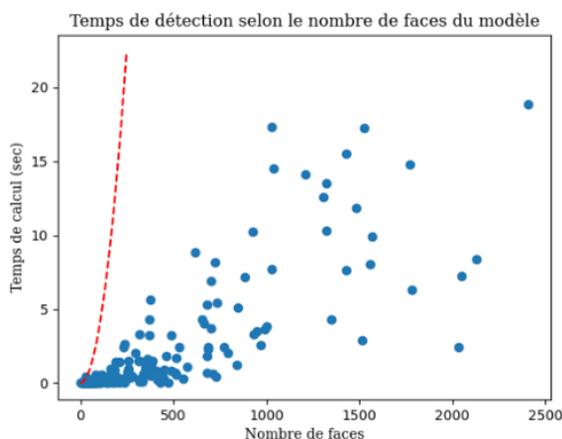


Figure 7- Temps de détection des interfaces sur 250 assemblages STEP

temps de calcul sont détaillés figure 7 en fonction du nombre de faces des modèles.

L'algorithme possédant une complexité quadratique, la vérification des boîtes englobantes permet un temps de

calcul bien en dessous du temps du calcul théorique. En effet, le temps moyen de vérification d'interface entre deux faces du modèle étant de 3.6 ms, si toutes les paires de faces devaient être parcourues, le temps de calcul théorique correspondrait à la courbe rouge sur la figure 7. La grande variabilité des temps de calcul pour des nombres de faces équivalentes peut venir de la compacité de l'assemblage (plus l'assemblage est compact plus les boîtes englobantes se chevauchent). Ces temps de calcul restent dans tous les cas beaucoup moins grands que si un utilisateur devait rentrer toutes les contraintes à la main.

## 5. CONCLUSION

La méthode de détection des contraintes présentée ici permet d'automatiser la tâche de spécification de contraintes sur des assemblages STEP non contraints. Cela permet notamment de travailler sur des assemblages provenant de BDD libres [10] et de reprendre les assemblages afin d'effectuer des animations, des simulations mécaniques, du réassemblage, ou bien créer des environnements de réalité virtuelle. La méthode considère les tolérances induites par les jeux mécaniques des pièces filetées, ou par des erreurs humaines. La redondance des contraintes est gérée par la définition de contraintes implicites, afin de tenir compte de la diversité de solutions possibles. La méthode proposée permet une pose des contraintes en privilégiant les contacts entre les faces, ce qui rend les contraintes spécifiées sémantiquement et géométriquement cohérentes. Cette cohérence sémantique permet de faciliter les opérations d'identification de séquences d'assemblage. La méthode peut aussi venir en complément d'un assemblage manuel, afin de nettoyer les contraintes redondantes et sémantiser les contraintes existantes.

Les plus grandes limites de cette méthode sont le type de contraintes détectées. En effet, les contraintes cinématiques sans contact comme par exemple un décalage entre deux plans / axes, ou bien un parallélisme entre deux axes sont beaucoup plus compliquées à détecter, car elles ont un sens seulement sémantique, et une compréhension du mécanisme et de ces jeux est essentiel afin de pouvoir les détecter. De plus, ces contacts mécaniques sont très présents sur des systèmes mécaniques, mais beaucoup plus rares sur des assemblages plus artistiques, modélisés à partir de surfaces B-Splines.

Ces travaux de détection sont une première étape obligatoire pour l'utilisation et la modification d'assemblages de modèles CAO provenant de BDD libres. La modification de ces assemblages permettra dans un second temps de générer de nouveaux assemblages mécaniquement cohérents, utiles pour de l'expansion de BDD par exemple.

## REFERENCES

- [1] Willis, Karl D. D., et al. JoinABLE: Learning Bottom-up Assembly of Parametric CAD Joints. arXiv, 22 avril 2022. arXiv.org, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.12772>.

- [2] Lupinetti, Katia, et al. « Automatic Extraction of Assembly Component Relationships for Assembly Model Retrieval ». *Procedia CIRP*, vol. 50, 2016, p. 472-77. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.148>.
- [3] Turner, J. U., et al. « Constraint representation and reduction in assembly modeling and analysis ». *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no 6, décembre 1992, p. 741-50. DOI.org <https://doi.org/10.1109/70.182674>.
- [4] Noeckel James et al. *Mates2Motion: Learning How Mechanical CAD Assemblies Work*. arXiv, 22 août 2022. arXiv.org, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.01779>.
- [5] Lambourne, Joseph G., et al. « BRepNet: A topological message passing system for solid models ». 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, 2021, p. 12768-77. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01258>.
- [6] Bepalov, Dmitriy, et al. « Local Feature Extraction and Matching Partial Objects ». *Computer-Aided Design*, vol. 38, no 9, septembre 2006, p. 1020-37. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2006.07.005>.
- [7] Vergez, Lucas, et al. « Automatic CAD Assemblies Generation by Linkage Graph Overlay for Machine Learning Applications ». *CAD'21 Proceedings*, CAD Solutions LLC, 2021, p. 46-50. DOI.org. <https://doi.org/10.14733/cadconf.2021.46-50>.
- [8] Crozet, Sébastien, et al. « Fast Computation of Local Minimal Distances between CAD Models for Dynamics Simulation ». *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 15, no 4, juillet 2018, p. 585-600. <https://doi.org/10.1080/16864360.2017.1419646>.
- [9] Marcheix, David, et Guy Pierra. « A Survey of the Persistent Naming Problem ». *Proceedings of the Seventh ACM Symposium on Solid Modeling and Applications - SMA '02*, ACM Press, 2002, p. 13. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1145/566282.566288>.
- [10] GrabCAD Community Library, <https://grabcad.com/library>
- [11] Bonino, Brigida, et al. « A Heuristic Approach to Detect CAD Assembly Clusters ». *Procedia CIRP*, vol. 100, 2021, p. 463-68. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.105>.
- [12] Kemmerer, S. (1999), *STEP: The Grand Experience*, Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.939>.
- [13] Jauhar, Tahir, et al. « Assembly Solving for Neutral Re-Imported Product Models ». *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 17, no 1, mai 2019, p. 108-23. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.14733/cadaps.2020.108-123>.
- [14] Pan, Chunxia, et al. « Determining Interference Between Parts in CAD STEP Files for Automatic Assembly Planning ». *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 5, no 1, mars 2005, p. 56-62. <https://doi.org/10.1115/1.1861473>.
- [15] Zou, Qiang, et Hsi-Yung Feng. « A Robust Direct Modeling Method for Quadric B-Rep Models Based on Geometry-Topology Inconsistency Tracking ». *Engineering with Computers*, vol. 38, no 4, août 2022, p. 3815-30. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01416-5>.

## ASSEMBLAGES CAO UTILISES

Machine à vapeur (figure 2, 6) :

<https://grabcad.com/library/steam-engine-119>

Levier mécanique (figure 1, 5) :

<https://github.com/AutodeskAILab/Fusion360GalleryDataset> (assemblage /20215\_e2eb3082)

# Amélioration de la soutenabilité de la fin de vie des produits industriels en utilisant un système d'aide à la décision basé sur le jumeau numérique et la gestion des connaissances

C.Mouflih <sup>a, \*</sup>, R.Gaha <sup>a</sup>, A.Durupt <sup>a</sup>, B.Eynard <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval, rue du Dr Schweitzer, CS 60319, 60203 Compiègne cedex France

\* e-mail : chorouk.mouflih@utc.fr

## 1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, dans le cadre de la crise environnementale les clients et les industriels sont de plus en plus conscients des problèmes liés au changement climatique et de l'épuisement des ressources naturelles. Ce qui consiste un moteur de changement important vers une industrie soutenable.

Dans ce cadre, le processus de désassemblage est une approche systématique séparant un produit en parties en supprimant ses composants, sous-ensembles ou parties constructives [3], c'est l'un des processus les plus stratégiques du refabrication puisqu'il joue un rôle clé dans le recyclage des matériaux et composants (Mok, Wu and Lee, 1999) ainsi qu'avec un potentiel très important pour réduire l'utilisation et le gaspillage de matières premières et augmente l'utilisation des ressources ainsi que limiter la pollution [6],[10]. Cependant, il est considéré comme un processus très critique en raison de son degré élevé d'incertitude causé par l'état inconnu de la qualité et de la structure des produits en fin de vie [3]. Ce qui rend l'acquisition et la disponibilité des données très difficiles et complique la prise de décision.

Afin d'avoir un désassemblage soutenable qui considère simultanément les implications économiques, environnementales et sociales associées au désassemblage des produits, il est nécessaire d'avoir une prise de décision concernant ce processus axé sur la soutenabilité. Elle doit également être basée sur des informations fiables et à jour sur le cycle de vie du produit. Cependant, en raison de la complexité et de toutes les incertitudes des produits en fin de vie (c'est-à-dire

formes, tailles, conditions physiques incertaines des matériaux utilisés, etc.) [1] et la difficulté d'obtenir des informations précises sur la vie des produits une fois que les produits sont retournés aux refabricants [8]. Il est très important d'explorer des nouvelles méthodes pour mettre à la fois toutes les informations nécessaires à la disposition des preneurs de décision afin qu'ils puissent prendre les décisions nécessaires pour avoir le processus de désassemblage le plus durable des produits en fin de vie.

Par conséquent et en raison des caractéristiques du système de gestion des connaissances qui peut être défini en tant qu'un système utilisé pour stocker les connaissances nécessaires à la résolution d'un problème spécifique [9]. Ainsi que les fonctionnalités du jumeau numérique qui est un modèle virtuel qui correspond à des entités physiques dans le monde réel. Il peut simuler le comportement et les performances des entités en temps réel. Il est basé sur la collecte et le partage d'informations, [2], l'utilisation de ces deux technologies peut être très intéressante dans le cadre de la prise de décision du processus de désassemblage des produits en fin de vie.

Peu d'études ont étudié l'utilisation d'un système de gestion des connaissances et un jumeau numérique dans le processus de désassemblage. Cependant, [4] ont présenté les applications de jumeau numérique pour une solution de tâches de diagnostic statiques et dynamiques. Ils ont aussi présenté l'usage d'un système de management basé sur la gestion des connaissances pour une solution des tâches des diagnostics statiques. En outre, [5] ont présenté une ombre numérique basée sur la connaissance, en tant que composant central des

futures applications du jumeau numérique dans la fabrication. Malgré le grand gain potentiel que les systèmes de gestion des connaissances et la technologie de jumeau numérique peuvent offrir pour adopter une approche soutenable et améliorer la soutenabilité de la fin de vie des produits, en particulier le processus de désassemblage, il existe encore un grand manque de recherche dans ce domaine spécifique.

L'objectif de ce travail est d'étudier le potentiel de l'outil d'aide à la prise de décision KBDTw pour améliorer la soutenabilité du désassemblage des produits en fin de vie en alimentant les preneurs de décision des premières étapes de cycle de vie des produits par les informations et connaissances.

Dans cette étude, nous premièrement présentons l'outil d'aide à la prise de décision KBDTw et son fonctionnement. Deuxièmement, nous présentons l'amélioration que l'outil peut apporter à la soutenabilité de la fin de vie des produits en alimentant les preneurs des décisions avec des informations et des connaissances issues des désassemblages de leurs produits. Troisièmement, une étude de cas de la fin de vie d'une boîte internet est développée. Et finalement une conclusion est présentée.

## 2. LE KBDTW POUR UN DESASSEMBLAGE SOUTENABLE

Afin d'améliorer la soutenabilité des produits en fin de vie et de résoudre les problèmes dus au manque des informations nécessaires sur le cycle de vie qui conduisent à une prise de décision non optimale [8], notre proposition consiste en un outil d'aide à la décision, qui vise à aider les parties prenantes à choisir le scénario de désassemblage des produits en fin de vie le plus

Notre étude est basée sur l'hypothèse que les produits dans leurs fins de vie sont retournés à leur fabricant pour le traitement de fin de vie. De plus, le fabricant effectue toutes les opérations d'entretien, maintenance et de réparation.

Le principe de fonctionnement de cet outil est comme suite (figure 1):

Afin de permettre une prise de décision qui va mener à

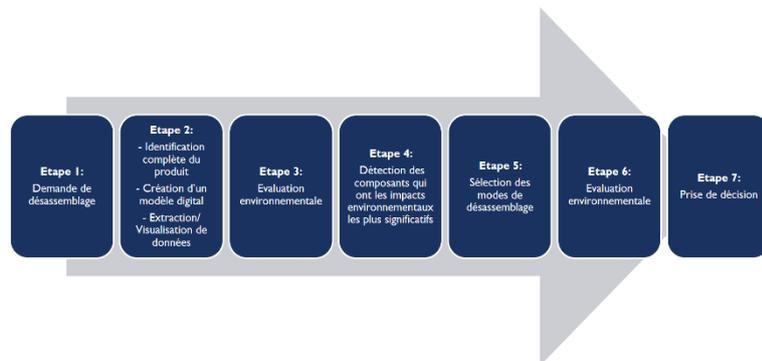


Figure 1 : les étapes de fonctionnement de l'outil d'aide à la prise de décision KBDTw

avoir un désassemblage soutenable, l'outil KBDTw permet en premier temps à détecter les composants avec l'impact environnemental le plus important (étape 4) en se basant sur une première étude environnementale (étape 3) du produit (sans prendre en considération la fin de vie), cette étude est réalisée en se basant sur les informations extraites de la base de connaissances (tableau 1) après l'identification du produit (à l'aide d'un QR code) et la création de son modèle digital (étape 2).

Ensuite, une deuxième et dernière étude environnementale est réalisée, en prenant en considération les différents scénarios de désassemblage.

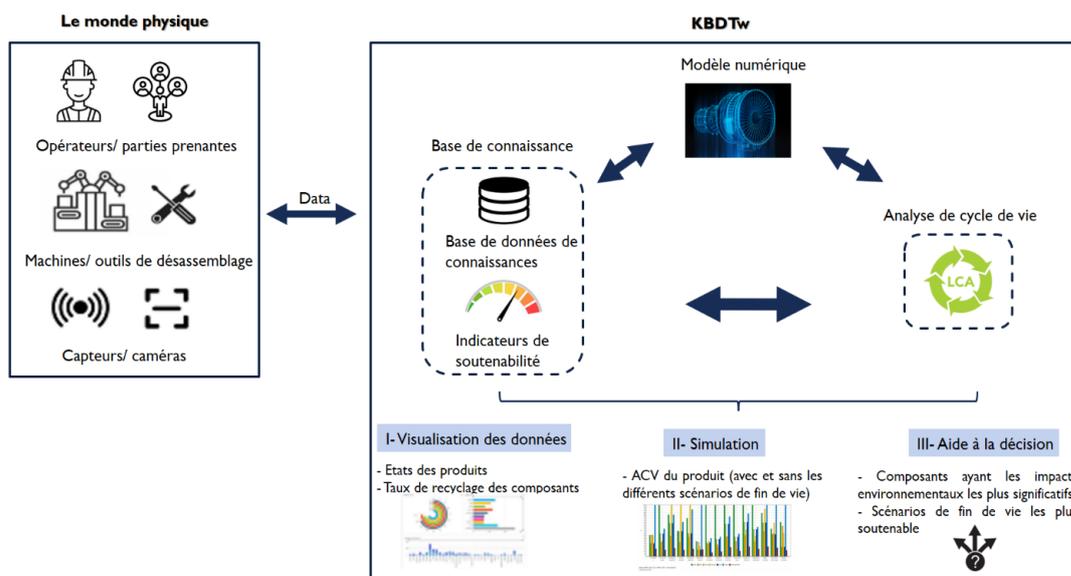


Figure 2 : Le Framework de l'outil d'aide à la prise de décision KBDTw

soutenable (cet outil a été défini dans un de nos travaux précédents.

Les scénarios de désassemblage sont précédemment identifiés par les preneurs de décision en se basant sur les

résultats de la première étude environnementale (étape 3).

Les résultats de la dernière étude environnementale doivent permettre de définir les scénarios de désassemblage les plus impactants et aider les preneurs de décision de choisir le scénario le plus adéquat et le plus soutenable. Le jumeau numérique va permettre d'assurer la continuité numérique de l'ensemble des composants du système et va être mis à jour constamment en s'alimentant de l'ensemble des données extraites de la base de connaissances ainsi que les données concernant le processus de désassemblage en temps réel.

**Tableau 1 : Exemple des informations de la base de connaissances**

Information
Nomenclature
Durée de vie
Temps d'utilisation
Description des interventions de maintenance
Dates des interventions de maintenance
la condition de des sous-ensembles, des assemblages intermédiaires, des sous-composants et des pièces du produit en fin de vie

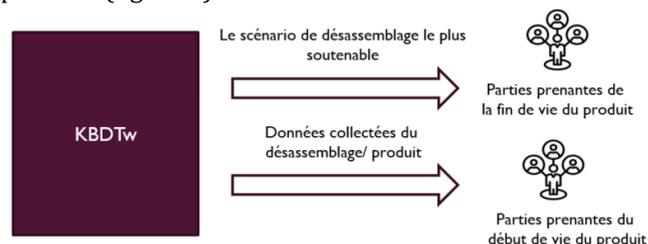
Le KBDTw a trois apports principaux comme présentés dans la figure 2 : la visualisation des données, la simulation de l'étude environnementale et l'aide à la décision.

- **La visualisation des données** : lors de l'étape d'extraction des données produites, l'outil fournit une visualisation complète des informations du produit extraites de la base de données produit et de la base de connaissances et du modèle numérique.
- **Simulation de l'étude environnementale** : L'outil fournit la simulation d'évaluation de l'impact environnemental, qui consiste en une analyse de cycle de vie du produit sans et avec différents scénarios de fin de vie.
- **Aide à la décision** : le système aide à la décision en détectant les composants ayant les impacts environnementaux les plus significatifs et les scénarios de désassemblage les plus soutenables.

### 3. AMELIORATION DE LA SOUTENABILITE DE DESASSEMBLAGE EN AMONT

En plus d'aide à la prise de décision pour avoir un désassemblage soutenable, grâce aux informations des produits, leurs fins de vie et leurs désassemblages le KBDTw peut permettre aussi l'amélioration de la soutenabilité du processus de désassemblage en amont, grâce aux partages des informations collectées durant l'opération de désassemblage avec les preneurs de

décision responsable du début et milieu de vie des produits (figure 3).



**Figure 3 : les sorties du KBDTw**

Diverses informations peuvent être collectées durant le processus de désassemblage (tableau 2) tel que : temps de désassemblage, problèmes de démontage/désassemblage particulier, coût de désassemblage, outils utilisés, opérations de désassemblage, les composants récupérés, les liaisons qui compliquent le désassemblage, etc. le partage de ces informations avec l'ensemble des services concernés (par exemple : service qualité, service conception, service design, etc.) et leurs analyses peuvent permettre l'optimisation de la conception et la fabrication du produit afin d'améliorer ses performances ainsi que son désassemblage (par exemple : les liaisons qui empêchent le désassemblage des composants qui ont souvent encore du potentiel de vie, les matériaux les plus fragiles et rapidement endommagés durant les opérations de désassemblage, etc.) ainsi qu'améliorer la conception et la fabrication des produits.

**Tableau 2 : Exemple des informations extraites du KBDTw**

Information	Définition
Composants ou sous-ensembles ciblés	Les différents composants ou sous-ensembles ciblés par l'opération du désassemblage
Types de liaisons	Les types de liaisons qui lient entre les composants et sous-ensemble du produit
Propriétés des liaisons	les propriétés mécanique et chimique de liaisons utilisées
Durée de désassemblage	Le temps de désassemblage pour chaque composant/ sous-ensemble ciblés
Coût de désassemblage	Le prix de désassemblage pour chaque composants/ sous-ensemble ciblé
Evaluation environnementale	l'étude environnementale pour les différents scénarios de désassemblage des composants/ sous-ensemble ciblés
Séquences de désassemblage faisables	Séquences de désassemblage faisables pour chaque composant/sous-ensemble cible
Outils de désassemblage	les outils de désassemblage utilisés
Configuration des outils de désassemblage	Les configurations des outils de désassemblage/ démontage
Etat du reste des composants et sous-ensembles	L'état des autres composants/ sous-ensembles après le désassemblage et le retrait des composants/ sous-ensemble ciblés
Problèmes de désassemblage	Les problèmes particuliers rencontrés lors du désassemblage

## 4. ETUDE DE CAS

L'étude de cas consiste en l'intégration de l'approche proposée dans le cadre de la fin de vie d'une box internet.

### 4.1. La fin de vie des boxes internet

Une box internet contient un couvercle en plastique et des composants électroniques. Sa fin de vie est comme suite (Ophéli, 2020) (Figure 4): après réception et déchargement des boîtes, celles-ci sont envoyées dans une zone de tri (tri des accessoires, des différents modèles de boîtes, etc.). Si le modèle est déclaré obsolète par l'opérateur, l'appareil est directement mis dans la filière de recyclage. Dans le circuit de traitement des boîtiers en fin de vie, il y a 4 zones particulières.

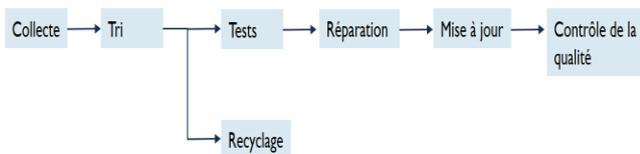


Figure 4 : Les processus de fin de vie de la box internet

Une zone de tests de fonctionnement des boxes internet et leurs coques en plastique, une zone de réparation, une zone de mise à niveau, une zone de reconditionnement et une dernière zone des tests de qualité.

### 4.2. L'amélioration de la soutenabilité de la fin de vie de la box internet

Dans cette étude de cas on considère qu'on a deux boxes internet en fin de vie retournées chez l'opérateur parce que leurs modèles sont obsolètes. On considère que la fin de vie de la première box va être traitée sans le système KBDTw et la deuxième box va avoir un traitement de fin de vie avec le système KBDTw.

Dans le premier cas, la box internet va aller directement au recyclage chez une entreprise spécialisée en recyclage des équipements électroniques. Où les appareils sont broyés après dépollution et ouverture mécanique, pour ensuite séparer les métaux ferreux des autres composants et les trier pour finalement soit opter à un recyclage pour reproduire des nouvelles matières, valorisation énergétique ou élimination en respect des réglementations.

Dans le deuxième cas, en utilisant le KBDTw, la box va suivre un autre parcours. Après l'identification de la box et l'extraction de toutes ses informations de vie et techniques, une étude environnementale dans le but d'identifier les composants avec le plus d'impacts environnementaux est réalisée. A partir de ses résultats, les preneurs de décision vont pouvoir choisir les scénarios de désassemblage les plus adéquats. Par exemple :

- Scénario 1 : effectuer un désassemblage non destructif, partiel et séquentiel pour récupérer

des composants/ sous-ensemble avec le plus d'impacts environnementaux et qui ont encore un reste de vie équivalant à trois ans et donc encore réutilisable encore trois ans après reconditionnement.

- Scénario 2 : effectuer un désassemblage destructif, partiel et séquentiel pour récupérer juste un sous-ensemble avec des impacts environnementaux très élevés et qui peut avoir encore quatre ans de durée de vie après nettoyage et réparation.

Une fois que les scénarios de désassemblage ont été choisis, une deuxième étude environnementale est réalisée cette étude va permettre d'identifier les scénarios de désassemblage le plus soutenable et permettre aux preneurs de décision de choisir le scénario le plus adéquat et avec moins d'impacts environnementaux.

Le KBDTw va permettre par la suite de partager les informations collectées durant la vie des boxes internet et toutes les opérations de leurs fins de vie avec les preneurs de décision et spécialistes des différents départements et phases de vie des produits pour pouvoir les analyser. L'analyse de toutes ces informations va permettre d'améliorer la conception, la fabrication et la maintenance des boxes internet afin d'éviter tous les problèmes de désassemblage ainsi que d'améliorer sa soutenabilité.

## 5. CONCLUSION

Le KBDTw est avant tout un outil d'aide à la prise de décision qui permet aux parties prenantes de la fin de vie des produits à choisir le scénario de désassemblage le plus soutenable possible. Ensuite, à partir des résultats de l'analyse de l'ensemble des informations qui peuvent être collectées durant le processus de désassemblage des produits grâce au KBDTw, et le partage de ces résultats avec l'ensemble des services concernés, les preneurs de décisions et experts de ces services peuvent améliorer la conception des produits en amont, fabrication ainsi que la maintenance des produits afin d'avoir une fin de vie et désassemblage optimale et le plus soutenable possible.

Vu que cette étude est encore dans les phases préliminaires, une étude plus approfondie sur les informations qui peuvent être récupérées, comment les récupérer et comment les stocker et ensuite les partager avec les parties prenantes va être mené dans le futur.

## 6. REFERENCES

- [1] Abdullah T. A. , Popplewell K., Page. C. J., A review of the support tools for the process of assembly method selection and assembly planning. International Journal of Production Research 41, 2391-2410, 2003. DOI:https://doi.org/10.1080/002075431000087265
- [2] Grieves M. , Vickers J., Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches, 85-113, 2017. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\_4

- [3] Gungor A., Gupta S. M., Disassembly Sequence Planning for Products with Defective Parts in Product Recovery. *Computers and Industrial Engineering* 35, 1-2, 161-164, 1998. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(98\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(98)00047-3)
- [4] Kostenko D., Kudryashov N., Maystrishin M., Onufriev V., Potekhin V., Vasiliev A., Digital twin applications: Diagnostics, optimisation and prediction. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 0574-0581, 2018. DOI:<https://doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.083>
- [5] Ladj A., Wang Z., Meski O., Belkadi F., Ritou M., Da Cunha C., A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective. *Journal of Manufacturing Systems* 58, 168-179, 2021. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.018>
- [6] Liu Q., Liu Z., Xu W., Tang Q., Zhou Z., Truong Pham D. T., Humanrobot collaboration in disassembly for sustainable manufacturing. *International Journal of Production Research* 57, 4027-4044, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1578906>
- [7] Mok S. M., Wu C. H., Lee D. T., A hierarchical workcell model for intelligent assembly and disassembly. In *Proceedings - 1999 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA 1999, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 125-130, 1999. DOI:<https://doi.org/10.1109/cira.1999.809989>
- [8] Parlikad A. K., McFarlane D., RFID-based product information in end-of-life decision making. *Control Engineering Practice* 15, 1348-1363, 2007. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.08.008>
- [9] Petroni, F. et al., 'Language models as knowledge bases?'. *EMNLP-IJCNLP 2019 - 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and 9th International Joint Conference on Natural Language Processing, Proceedings of the Conference. Association for Computational Linguistics*, 2463-2473, 2019. doi: 10.18653/v1/d19-1250.
- [10] Slama I., Ben-Ammar O., Dolgui A., Masmoudi F., Approches d'optimisation pour un problème de planification de désassemblage sous incertitude des délais de désassemblage, 2020. DOI:<https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2020.0578>
- [11] Wiendahl H. P., Seliger G., Perlewitz H., and Bürkner S., A general approach to disassembly planning and control. *Production Planning and Control* 10, 718-726, 1999. DOI:<https://doi.org/10.1080/095372899232542>



## Méthode d'évaluation en deux étapes d'un outil d'aide à la décision en fabrication additive

E-H. Mechekour <sup>a,b,\*</sup>, F. Vignat <sup>a</sup>, F. Pourroy <sup>a</sup>, C. Grandvallet <sup>a</sup>, Ph. R. Marin <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

<sup>b</sup> University of Tiaret, 14000, Tiaret, Algérie

\* e-mail : elhadi.mechekour@grenoble-inp.fr

### 1. INTRODUCTION

Dans une industrie manufacturière soumise à des contraintes de plus en plus fortes à cause de la concurrence et des exigences environnementales, de nouvelles technologies voient le jour pour répondre en partie à cette problématique. Parmi ces technologies, on retrouve la fabrication additive qui connaît un essor grandissant et qui fait l'objet de notre contexte d'étude. Dans ce contexte de fabrication additive, l'ingénieur Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) doit effectuer des tâches associées à des activités complexes. Pour l'aider dans son travail en minimisant les erreurs et les mauvaises décisions, plusieurs modèles de connaissances et d'outils informatiques sont développés.

En se référant au travail de Grandvallet et al. [1] qui décrit le processus de fabrication additive comme une succession d'étapes (voir figure 1), nous allons nous focaliser sur l'activité d'orientation de pièces qui influence le reste du processus de fabrication additive et surtout la qualité des pièces obtenues. Beaucoup de travaux ont traité du problème d'orientation de pièces en technologie de Fusion sur Lit de Poudre (FLP) [2][3]. Dans notre article, nous allons utiliser le logiciel COFFA développé dans le cadre du projet ANR COFFA [4]. Ce logiciel se base sur des règles d'action illicites par des experts métiers et mathématisées afin de quantifier la désirabilité liée à chaque critère en les représentant sous forme de graphe de température comme le montre la figure 2.

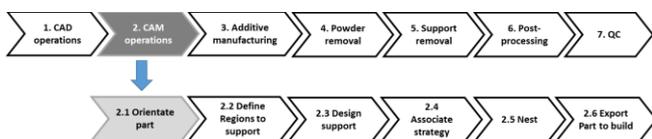


Figure 1 - Processus de fabrication additive (FLP)

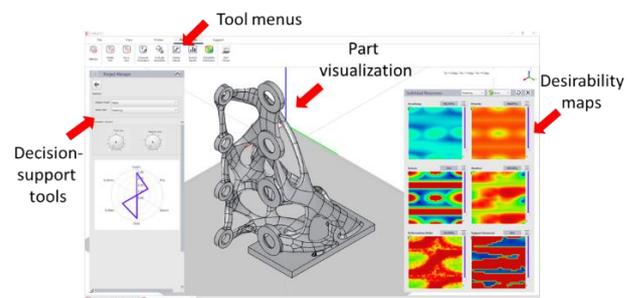


Figure 2 - Interface du logiciel COFFA

Enfin, l'objectif de notre travail de recherche est de se focaliser sur l'évaluation d'un logiciel d'aide à la décision pour l'orientation de pièces (COFFA), réalisées en fabrication additive pour une technologie de fusion sur lit de poudre.

### 2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

#### 2.1. Evaluation des logiciels

Avant de parler d'évaluation de logiciel, on aimerait donner une définition de la qualité d'un logiciel parce que cela nous semble important de connaître l'objet de notre évaluation. D'après la norme ISO9126 [5], la qualité d'un logiciel est représentée par les éléments suivants, à savoir : fonctionnalité, fiabilité, utilisabilité, efficacité, maintenabilité et portabilité. La norme SquaRE [6] définie depuis 2005 est la norme qui succède au standard ISO 9126. Elle a été définie à partir de ISO 9126 et de la partie évaluation de la norme ISO 14598. Cette dernière décrit deux modèles distincts : un modèle qualité lié à l'utilisation du logiciel et un modèle qualité lié à la production du logiciel. Le problème de ce type de norme est qu'il n'y a pas de lien direct entre les caractéristiques et les métriques.

En faisant une recherche bibliographique sur le concept d'évaluation de logiciels, cela renvoie à trois termes bien distincts qui sont : performance, utilité et utilisabilité. Ces termes regroupent les éléments qui définissent la qualité d'un logiciel d'après la norme ISO.

Dans le cas de l'évaluation des performances, on retrouve des recherches axées sur les aspects techniques du fonctionnement du logiciel (temps de réponse, capacité de calcul, etc.) [7][8].

Dans le cas de l'évaluation de l'utilité, on retrouve quelques travaux qui explorent l'aspect financier de la mise en place d'une solution informatique au sein d'une entreprise [9][10]. Dans le cas de la fabrication additive le choix étant limité en terme de solutions logiciels commerciales et la difficulté de travail nécessitant des outils avec de bonnes capacités de calcul, on considère que ce facteur n'a pas besoin d'être développé dans notre article.

Dans le cas de l'utilisabilité, on retrouve beaucoup de travaux qui se basent sur l'expérience utilisateur afin de déterminer l'efficacité, l'efficience et la satisfaction d'un logiciel en permettant de réaliser une tâche dans un contexte bien déterminé [11][12].

D'autre part, dans un contexte d'ingénierie nous avons l'habitude d'évaluer les logiciels techniques en se focalisant sur la qualité de leurs résultats. Par exemple, pour les logiciels de calcul et de simulation on compare les résultats obtenus par rapport aux résultats théoriques ou expérimentaux.

Mais dans le cas d'un logiciel d'aide à la décision dans un contexte d'ingénierie la question qui se pose est la suivante : comment évaluer la qualité du logiciel d'aide à la décision et des résultats obtenus avec ce dernier ? Sachant que les résultats sont fortement impactés par le facteur humain à la différence des logiciels de calcul et simulation (avec les mêmes paramètres et hypothèses de calcul), et que l'évaluation de l'utilisabilité n'est pas suffisante pour avoir une métrique sur la qualité des résultats.

## 2.2. Méthodes d'évaluation

La classification des méthodes d'évaluation est très souvent liée au domaine d'application. En général, on trouve des méthodes quantitatives vs qualitatives. Et les deux domaines où le terme méthode d'évaluation est le plus répandu sont le domaine de l'éducation et des finances. Dans notre contexte de fabrication additive, l'évaluation est considérée comme faisant partie du contrôle qualité. Le contrôle qualité consiste à évaluer la conformité d'une pièce par rapport au cahier des charges et dans certains cas s'assurer que le procédé de fabrication adéquat à bien été respecté [13]. D'après la norme ISO900X, l'évaluation de la conformité passe par trois types de contrôles :

- Contrôle des caractéristiques mécaniques (allongement, module de Young, Résistance à la rupture...);
- Contrôle des caractéristiques physiques (dimensions, rugosité, dureté...);

- Contrôle non destructifs (défauts surfaces, défauts masse...).

L'autre typologie d'évaluation qui nous a intéressé concerne le domaine de l'éducation, mais qui peut très bien être transposée à d'autres domaines, et qui est la suivante [14] :

- Pré-évaluation ou évaluation diagnostique : elle permet de connaître le niveau des apprenants pour ajuster la formation donnée.
- Évaluation formative : elle permet de faire une évaluation continue et ainsi avoir un feedback sur les points sur lesquels il faudra se baser pour continuer la formation dans de bonnes conditions.
- Évaluation sommative : elle permet de faire une évaluation globale des acquis à la fin d'une formation. Par ailleurs, elle permet aussi d'évaluer l'efficacité de l'apprentissage.
- Évaluation certificative : elle permet d'évaluer la qualité de la formation et de voir si elle est toujours adaptée.
- Évaluation normative ou évaluation comparative : elle permet de comparer les performances d'un apprenant à une norme moyenne.
- Évaluation critérée : elle permet de mesurer les performances d'un apprenant en fonction de critères prédéfinis.
- Évaluation ipsative : elle permet de mesurer les performances d'un apprenant par rapport à ses performances passées.

## 2.3. Question de recherche

Dans un contexte de fabrication additive, nous avons besoin d'évaluer qu'est-ce qu'un bon choix d'orientation de pièces en utilisant un outil d'aide à la décision. Sachant que l'impact de ces choix sont cruciaux sur la qualité des pièces fabriquées, nous devons répondre à la première question : qu'est-ce qu'un bon choix d'orientation de pièces ? et dans un deuxième temps répondre à la question : est-ce qu'une bonne orientation effectuée avec le logiciel COFFA correspond à une bonne qualité de pièce après fabrication avec l'EBM (Electron Beam Melting) ? D'après l'étude bibliographique que nous avons menée, il n'existe pas de méthode pour ce type d'évaluation. Ce qui nous a poussé à voir dans différents domaines les approches d'évaluation pour son inspirer et les adapter à notre contexte comme nous allons le voir dans la suite de l'article.

## 3. METHODOLOGIE

En se référant à notre recherche bibliographique, nous pouvons dire qu'il n'y a pas de méthode préexistante pour répondre à notre question de recherche. Pour cela, nous allons adapter les outils d'évaluation à notre contexte. La figure 3 synthétise notre démarche d'évaluation en deux étapes.

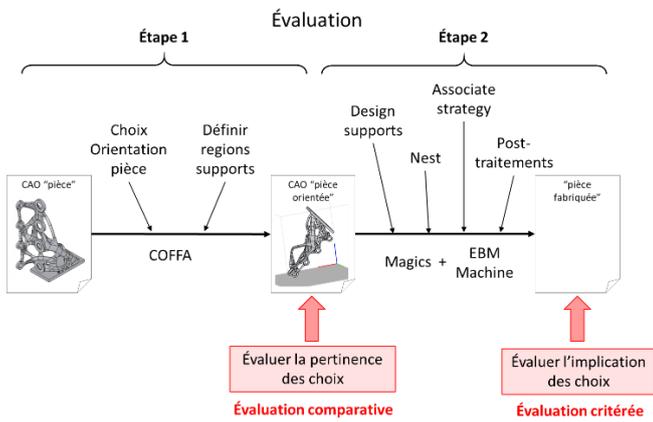


Figure 3 – Méthode d'évaluation en deux étapes

Dans un premier temps, l'utilisateur du logiciel COFFA va effectuer l'orientation de la pièce suivant un scénario de conception donné. Le résultat de son choix sera évalué par une méthode comparative par rapport à une valeur de référence que nous aurons au préalable définie avec l'aide d'un groupe d'experts métiers. Cette étape permet d'évaluer la pertinence des choix faits par l'utilisateur.

Dans un deuxième temps, l'utilisateur va mobiliser d'autres outils pour effectuer le reste du processus de fabrication additive en FLP afin de fabriquer la pièce orientée précédemment. En faisant attention à bien minimiser le parasitage de l'activité d'orientation de pièces (en suivant les recommandations des experts métiers), nous allons évaluer la qualité de la pièce fabriquée en utilisant une méthode d'évaluation critérée (conformité au cahier des charges). Cette étape permet d'évaluer l'implication des choix faits par l'utilisateur sur la pièce finie.

Afin de valider cette approche d'évaluation en deux étapes, nous avons mis en place une étude empirique où des experts en fabrication additive ont été mis en situation avec un scénario d'orientation de pièces bien défini. Dans un deuxième temps, un travail de fabrication de ces pièces orientées a été effectué par un groupe d'experts plus réduit pour mener la deuxième partie de l'évaluation. Les détails et résultats de cette expérimentation seront traités dans la suite de l'article.

#### 4. ETUDE DE CAS « LOGICIEL COFFA »

Dans cette section, nous allons présenter la méthode d'évaluation en deux étapes appliquées au logiciel d'aide à la décision COFFA pour l'orientation de pièces en Fabrication additive de type EBM.

##### 4.1. Première étape d'évaluation

La première étape d'évaluation du logiciel COFFA consiste à comparer les résultats d'orientation des pièces obtenus par chaque expert métier participant à l'étude empirique par rapport au résultat de référence. Les valeurs d'orientation de référence sont établies par un groupe d'experts dans un cadre collégial en fin de l'expérimentation.

Dans cette étude empirique chaque participant devait orienter des pièces avec des scénarios de conception adaptés à chacune des pièces de la plus simple à la plus complexe (voir figure 4). L'orientation devait être effectuée avec deux logiciels différents. Une première fois avec un simple visualisateur 3D sans aucune fonctionnalité d'aide aux choix et une deuxième fois avec le logiciel d'aide à la décision COFFA.

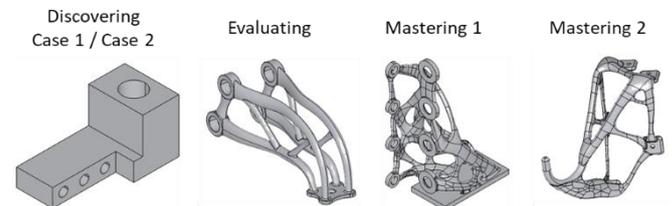


Figure 4 – Pièces à orienter avec le logiciel COFFA

Pour effectuer la comparaison des résultats d'orientation obtenus nous avons utilisé deux indicateurs : la désirabilité agrégée et les angles d'orientation suivant les axes X et Y. Sachant que la désirabilité agrégée représente le produit pondéré des désirabilités des règles d'action représentées dans l'interface du logiciel COFFA (figure 2).

La figure 5 montre un exemple des résultats de comparaison obtenus pour la dernière pièce (Mastering 2).

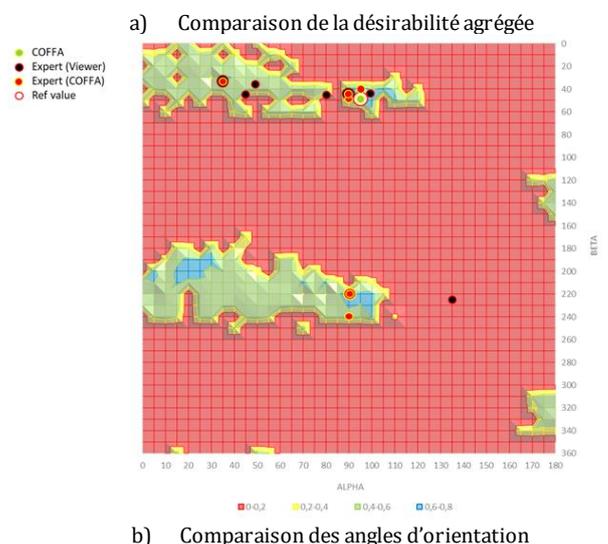
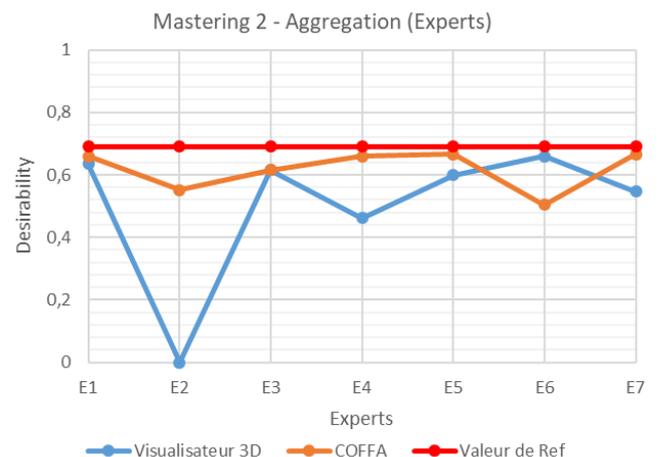


Figure 5 – Résultats première étape de l'évaluation

La figure 5.a permet de voir l'écart entre les valeurs de désirabilité agrégée obtenues en utilisant le visualisateur 3D et COFFA par rapport à la valeur de référence. L'utilisation du logiciel permet une meilleure orientation en se basant sur ce critère. Pour certaines pièces dont les résultats ne sont pas représentés dans la figure 5 montre que les experts ne peuvent pas évaluer correctement les règles d'action liées à l'orientation (exemple : critère de risque de déformation ou de support difficile à enlever) ce qui induit des scores de désirabilité très bas lors de l'utilisation d'un visualisateur 3D sans assistance à l'orientation.

La figure 5.b permet de voir que l'utilisation du logiciel COFFA fait converger le choix des experts vers des îlots de solutions avec une bonne désirabilité. De plus les solutions retenues sont souvent une orientation donnée avec une orientation symétrique à elle par rapport à un axe X ou Y.

#### 4.2. Deuxième étape d'évaluation

La deuxième étape de l'évaluation consiste à vérifier la qualité des pièces orientées avec le logiciel COFFA après fabrication en EBM. Pour atteindre notre objectif nous avons mis en place un protocole de travail pour minimiser les interférences dues aux activités qui suivent l'orientation des pièces. Pour cela, nous avons identifié que l'activité de supportage représentait le plus gros risque de parasitage. Par conséquent nous avons regroupé les experts pour effectuer cette tâche, comme dans le cas de l'établissement des valeurs de référence, en travail de groupe en prenant soin de suivre les recommandations d'experts industriels avec lesquels nous avons mené des projets antérieurs (établissement des règles d'action). L'autre point important étant le « Nesting », nous avons fait attention de positionner les pièces en respectant les distances minimales pour éviter l'influence des pièces entre elles ainsi qu'avec les bords du plateau de la machine (voir figure 6).

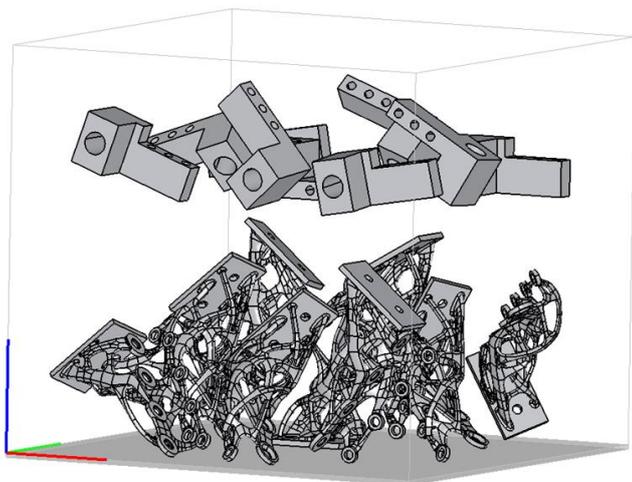


Figure 6 – Positionnement des pièces dans la machine EBM

La finalisation de cette étape étant en cours, nous allons juste discuter des points clés de la suite du travail d'évaluation.

Cette étape d'évaluation critériée nécessite l'établissement de critères qui permettront, en plus de vérifier la conformité des pièces, l'impact des choix d'orientation réalisés en utilisant le logiciel COFFA. In fine, cela permettra de faire le lien entre une bonne désirabilité et une bonne qualité de pièce, qui est l'objectif sous-jacent à ce travail d'évaluation.

À la différence des critères de conformité des pièces en contrôle qualité cités précédemment, nous n'allons pas nous focaliser seulement sur des critères liés aux pièces fabriquées. Nous allons aussi avoir des critères liés aux supports des pièces que l'on considère comme étant un bon indicateur de l'orientation des pièces. Donc, le choix des critères retenus sera composé de :

- Critères liés à la pièce : contrôle des caractéristiques physiques (dimensions, rugosité, déformations, ...);
- Critères liés aux supports : types, volume, temps d'enlèvement.

#### 5. DISCUSSION

Avant de commencer cette section, nous souhaitons apporter un éclaircissement sur la suite des discussions. La mise en œuvre de notre démarche n'étant pas encore arrivée à terme, nous ne pouvons tirer de conclusion que sur la première étape de l'évaluation. Toutefois, nous allons présenter nos réflexions sur la deuxième étape de l'évaluation, sachant qu'une grande partie du travail a déjà été menée.

La première étape de l'évaluation qui consiste à comparer le choix de l'utilisateur par rapport à une valeur de référence a permis de constater la pertinence des choix faits par l'utilisateur en utilisant le logiciel COFFA à la différence de l'utilisation d'un visualisateur 3D sans assistance à l'orientation des pièces. Le point marquant étant que l'utilisation du logiciel COFFA a évité aux experts de faire des choix trop mauvais pour des pièces avec une géométrie complexe.

Un résultat intéressant dans cette étape concerne l'utilisation du logiciel COFFA par les experts comme outil de vérification de choix d'orientation et parfois cela leur a permis de justifier certains choix, qu'ils avaient pressentis en se basant sur leur expérience et leur savoir-faire, sans pouvoir les expliquer.

Concernant le choix des indicateurs, à savoir la désirabilité agrégée ainsi que le positionnement du choix des angles d'orientation dans la carte des désirabilités agrégées, cela a permis d'avoir une représentation de la pertinence des choix des utilisateurs et de l'efficacité du logiciel d'aide à la décision. Donc, suivant l'objectif de cette étape d'évaluation comparative, nous pouvons l'utiliser soit pour évaluer l'outil d'aide à la décision ou bien la qualité de travail de l'utilisateur par rapport à un groupe d'experts.

Nous constatons que le résultat de cette étape peut représenter un jalon pour la suite du processus de fabrication additive et sa validation permet d'entreprendre la fabrication des pièces avec un risque minime.

Pour finir sur cette étape d'évaluation, nous pouvons dire que l'évaluation comparative peut être appliquée à plusieurs niveaux d'un processus de travail si ceux-ci sont considérés comme étant suffisamment importants pour le reste du processus. Toutefois, pour ne pas alourdir le processus de travail global, nous pouvons imaginer d'introduire une règle de type Pareto 80/20 pour le choix des jalons à évaluer.

La deuxième étape de l'évaluation qui consiste à évaluer les implications des choix d'orientation des pièces faits avec le logiciel COFFA sur les pièces fabriquées, est une adaptation du contrôle qualité des pièces mécaniques à la fabrication additive en prenant en compte le supportage des pièces qui est fabriqué en même temps que les pièces et qui a un effet non encore bien identifié sur elles.

L'objectif de cette étape est de faire la concordance entre une bonne désirabilité agrégée et une bonne qualité de pièce fabriquée, et par conséquent l'efficacité du logiciel d'aide à la décision COFFA qui permet de faire des choix d'orientation de pièces en maximisant la désirabilité agrégée.

La difficulté de cette étape étant que la suite du processus de fabrication additive, surtout la génération de supports, peut influencer considérablement la qualité des pièces fabriquées. D'où le recours à un groupe d'experts pour réaliser ce travail en faisant attention que les pièces réalisées soient le moins impactées par cette tâche ou que l'influence des supports soit la même pour toutes les pièces. Les experts nous ont permis d'établir quel type de support on doit utiliser pour chaque type de surface ainsi que les paramètres associés. Ce travail a permis de voir les limites des logiciels commerciaux actuels, en particulier pour la technologie EBM. L'exploitation d'un brevet [15] développé au sein de l'équipe de recherche est actuellement en cours d'exploitation pour apporter des solutions aux problèmes rencontrés dans le supportage des pièces en EBM.

## 6. CONCLUSION

Cet article propose une démarche d'évaluation en deux étapes pour les logiciels d'aide à la décision en fabrication additive. La première étape permet de vérifier la pertinence des choix effectués et la deuxième étape permet d'évaluer l'impact des choix précédents sur la qualité des pièces obtenues après fabrication.

L'étude empirique nous a aidé à observer et à quantifier les résultats d'un cas d'étude en utilisant le logiciel d'orientation de pièces COFFA et la machine de fabrication additive de type EBM Arcam®.

La finalisation de la deuxième étape de l'établissement nous permettra de voir la pertinence des indicateurs de qualité mis en place ainsi que l'influence du parasitage des autres activités du processus de fabrication additive FLP - EBM.

## REFERENCES

- [1] Grandvallet, C., Pourroy, F., Prudhomme, G., & Vignat, F. (2017). From elicitation to structuration of additive manufacturing knowledge. In 21st international conference on engineering design ICED17, Vol. 6: design information and knowledge, Vancouver, Canada 21-25.08.2017.
- [2] Pandey, P. M., Reddy, N. V., & Dhande, S. G. (2007). Part deposition orientation studies in layered manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 185, 125–131.
- [3] Zhang, Y., Bernard, A., Harik, R., & Karunakaran, K. P. (2017). Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 1393–1407.
- [4] Mbow M. M., Knowledge-based decision support in CAM for additive manufacturing: A rules mathematization approach. Université Grenoble Alpes, soutenue le 11/12/2020.
- [5] ISO/IEC 9126:1991, Génie du logiciel — Qualité des produits.
- [6] ISO/IEC 25000:2014, Ingénierie des systèmes et du logiciel — Exigences de qualité des systèmes et du logiciel et évaluation (SQuaRE).
- [7] ANN FITZSIMMONS AND TOM LOVE, A Review and Evaluation Of Software Science. *Computing Surveys*, Vol. 10, No. 1 March 1978.
- [8] MIGUEL, José P., MAURICIO, David and RODRÍGUEZ, Glen. A review of software quality models for the evaluation of software products. *International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA)*, Vol.5, No.6, November 2014. DOI : 10.5121/ijsea.2014.5603
- [9] YILMAZ, Nebi et TARHAN, Ayça Kolkukisa. Meta-models for Software Quality and Its Evaluation: A Systematic Literature Review. In : The 30th International Workshop on Software Measurement (IWSM) and the 15th International Conference on Software Process and Product Measurement (MENSURA). 2020.
- [10] Boehm, B.W. (2001). *Software Engineering Economics*. In: Broy, M., Denert, E. (eds) *Pioneers and Their Contributions to Software Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-48354-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48354-7_5)
- [11] Melody Y. Ivory and Marti A. Hearst. The state of the art in automating usability evaluation of user interfaces. *ACM Computing Surveys*, 33(4) -470-516, December 2001.
- [12] Brooke, J. SUS: A "quick and dirty" usability scale. In: Jordan, P.W., Thomas, B., Weerdmeester, B.A., McClelland, A.L. (Eds.), *Usability Evaluation in Industry*. Taylor and Francis, London, 1996.
- [13] ISO 9001:2015, Systèmes de management de la qualité — Exigences.
- [14] Nevo, D. (1983). The Conceptualization of Educational Evaluation: An Analytical Review of the Literature. *Review of Educational Research*, 53(1), 117–128. <https://doi.org/10.3102/00346543053001117>
- [15] Frédéric Vignat et Christelle Grandvallet, Systems And Methods For Determining Support Structures In Additive Manufacturing, U.S. patent application number 17/504436.



# Evaluation des types d'informations et des supports de transmission pour favoriser l'assimilation de connaissances liées à la fabrication additive

C. Douin <sup>a</sup>, E. Gruhier <sup>a,\*</sup>, R. Kromer <sup>b</sup>, O. Christmann <sup>c</sup>, N. Perry <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Arts et Metiers Institute of Technology, University of Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France

<sup>b</sup> University of Bordeaux, CNRS, Arts et Metiers Institute of Technology, Bordeaux INP, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France

<sup>c</sup> Arts et Metiers Institute of Technology, LAMPA, HESAM University, Changé, France

\* e-mail : elise.gruhier@ensam.eu

## 1. INTRODUCTION

La transmission de connaissances est un facteur clé pour le développement de la Fabrication Additive (FA) dans l'industrie. Pour des concepteurs n'étant pas spécialisés dans ce domaine, beaucoup de cycles de prototypage peuvent être nécessaires avant l'obtention d'un résultat satisfaisant le cahier des charges. Concevoir pour la FA implique la prise en compte des restrictions et règles spécifiques au procédé. La production ainsi que le temps de conception doivent être optimisés, en utilisant par exemple un système automatisé d'analyse de fabricabilité. Pour les procédés de fabrication traditionnels, de tels outils ont commencé à se développer dès les années 1990 [1], et des efforts ont déjà été fait pour les intégrer dans des systèmes de conception et fabrication assistés par ordinateur (CAO et FAO) [2]. De nombreuses recherches ont été menées sur des règles et méthodes de conception propres à la FA, mais peu de tentatives ont été faites pour mettre au point des systèmes automatisés d'analyse de fabricabilité et de qualité qui puissent identifier les problèmes spécifiques des modèles solides [3]. Pour assurer la qualité du produit, il est nécessaire que le concepteur puisse prendre des décisions liant le produit, le procédé et les matériaux choisis. La formalisation des connaissances des experts est donc un enjeu majeur pour optimiser le temps et le coût de la conception d'un objet destiné à être produit en FA [4]. Une fois ces connaissances formalisées, le support de communication choisi peut avoir un impact important sur leur transmission. L'essor de la Réalité Virtuelle (RV) dans le domaine de la conception a permis

de démontrer que cette technologie favorisait la créativité [5] et la communication entre différents acteurs [6]. La question se pose alors de savoir si la RV pourrait également permettre de faciliter la transmission des connaissances liées à la FA lors de la conception détaillée, et de déterminer si l'assimilation des connaissances est favorisée en fonction de leur type et du moment auquel elles sont transmises. Une expérimentation sur des personnes novices en FA est proposée en évaluant la progression de différents groupes en fonction du niveau de connaissances transmises et du support de transmission utilisé. A travers cette expérimentation, le but est de déterminer les types d'informations, la quantité et qualité des informations à apporter en fonction de la pièce considérée, ainsi que les supports et les instants auxquels sont transmises ces connaissances pour permettre une meilleure assimilation de celles-ci lors de la conception détaillée. Les résultats obtenus permettront alors d'établir un moyen de faciliter la montée en compétences des personnes novices pour optimiser le temps de développement des produits conçus pour la FA.

Dans un premier temps un bref état de l'art est proposé sur la transmission de connaissances liées à la FA, ainsi que sur l'utilisation de la RV dans la conception et l'éducation. La méthodologie employée est ensuite explicitée pour finalement mener à une discussion des résultats obtenus. Cette étude se base à la fois sur l'évolution des travaux produits par les participants lors d'un travail de conception en trois phases, ainsi que sur leurs réponses à un questionnaire permettant d'évaluer leur ressenti sur les outils proposés à la fin de chaque étape de l'expérimentation.

## 2. ETAT DE L'ART

### 2.1. Transmission de connaissances liées à la FA

Une façon de définir la connaissance serait de dire qu'elle est synonyme d'expertise, c'est-à-dire qu'il s'agirait, d'après Milton [7], de ce qui permet à des personnes expertes dans un domaine d'effectuer un travail efficace et efficient et de faire face à des situations complexes. Deux catégories majeures de connaissances sont généralement distinguées : les connaissances explicites sont formelles, systématiques et facilement transmissibles, alors que les connaissances tacites relèvent souvent de l'expérience et des intuitions, ce qui les rend difficilement exprimables [8].

Dans le cadre de la conception, la transmission de connaissances est essentielle. Par exemple, si les contraintes de production ne sont pas prises en compte lors de la conception, la qualité, voire la fabricabilité du produit pourraient être directement impactées. Pour faciliter la transmission des connaissances tacites venant de l'expérience d'un acteur dans un certain domaine à des personnes n'ayant pas cette expérience, il peut être nécessaire de rendre ces connaissances explicites. Il a été montré par Laverne [9] que la typologie de connaissances, qu'elles soient tacites ou explicites, n'avait aucune incidence sur la recherche de solutions créatives. L'expérience présentée par la suite se concentrera donc sur une transmission de connaissances explicites.

Plusieurs moyens peuvent permettre de formaliser des connaissances explicites. Les travaux de Grandvallet et al. [4] sont centrés sur l'élicitation, c'est-à-dire l'interaction avec des experts pour expliciter des connaissances tacites, et la structuration de connaissances liées à la FA. L'approche développée a permis de mettre au point des règles d'action et des définitions s'intégrant dans le cadre de la conception pour la FA. Une fois ces connaissances formalisées, elles deviennent transmissibles. La question se pose alors de comment les transmettre, à quel moment et grâce à quel support.

Pour automatiser cette transmission dans le cadre des pièces complexes issues de la FA, une approche par reconnaissance de formes est nécessaire. Les modèles 3D peuvent être décomposés en un ensemble d'éléments géométriques caractéristiques, ou « features », pour lesquels des données quantitatives peuvent être apportées. Dans ce but, des analyses effectuées sur des pièces benchmarks permettent de mesurer les déviations par features des pièces produites par FA [10].

### 2.2. Utilisation de la RV pour la FA et l'éducation

Les usages de la RV se multiplient dans l'industrie et dans l'éducation. Lors de phases amont de la conception, elle apporterait une meilleure créativité et qualité des concepts proposés par les utilisateurs [5]. La RV est par ailleurs particulièrement utilisée pour la revue de conception, puisqu'elle permettrait de détecter légèrement plus de défauts que sur un écran classique, d'après Wolfartsberger et al. [11]. La RV semble donc être un support envisageable pour transmettre des

connaissances lors de la conception détaillée pour des pièces complexes.

En ce qui concerne la RV spécifiquement pour la FA, Ostrander et al. [12] se sont intéressés à la pertinence d'utiliser la RV pour enseigner des concepts généraux. L'étude compare l'utilisation passive, c'est-à-dire en visualisant mais sans interaction avec l'environnement, et active, en manipulant des objets, à un enseignement classique. Il est alors montré que si la RV permet bien d'améliorer la compréhension d'un environnement spatial, elle ne présente pas d'avantage significatif sur l'apprentissage des connaissances liées à la FA par rapport à un apprentissage traditionnel. L'approche proposée est donc de déterminer si l'usage de la RV est propice à la transmission de connaissances propres à la FA avec une démarche de présentation par features lors de la conception détaillée.

## 3. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

Dans le cadre de la mise au point d'un outil d'aide à la conception pour la FA, il est nécessaire de déterminer quelles informations doivent être transmises, à quel moment, et grâce à quel support. L'étude doit permettre d'évaluer si un utilisateur profane peut acquérir les connaissances nécessaires à l'amélioration de la géométrie de la pièce qu'il est en train de concevoir, le plus efficacement possible lors de la conception détaillée grâce à un apport d'informations globales et locales (par features). L'expérimentation proposée a également pour but de déterminer si l'usage de la RV est pertinent pour transmettre ces informations spécifiques, avec la possibilité de manipuler la pièce en cours de conception.

L'expérience a été menée en trois séances de deux heures sur un groupe de 19 étudiants de niveau bac +2 en IUT GMP (Génie Mécanique et Productique) de Bordeaux n'ayant aucune, ou très peu, de connaissances en FA. Lors de la première phase du projet, il est demandé aux participants de concevoir une potence permettant de lier le guidon au cadre d'un vélo, tout d'abord individuellement, puis en groupes de quatre ou de cinq. Une fois leur solution schématisée et décrite, un questionnaire individuel leur est distribué contenant 6 items sous formes d'échelles de Likert à quatre choix, « 1 » correspondant à un désaccord total et « 4 » à un fort accord. Un questionnaire différent est distribué à la fin de chaque phase de manière à déterminer le ressenti des participants sur les connaissances et supports qui leur sont proposés. Pour la phase 1, une partie des questions porte donc sur une auto-évaluation de leurs connaissances et une seconde partie sur les types de connaissances qu'ils estiment être les plus utiles pour leur progression (Figure 1, Phase 1).

Au début de la seconde phase, un cours théorique sur les procédés et principales règles de conception pour la FA leur est donné. Les informations transmises comprennent par exemple des indications très générales et valables pour tous les procédés de FA tels que les notions de couches, support et règles, ainsi que des informations sur les différences entre les procédés

existants. Il leur est alors demandé de proposer une nouvelle géométrie ainsi que de répondre à un second questionnaire. Les affirmations de la phase 1 sont reprises de manière à comparer leurs ressentis et attentes avant et après l'apport de connaissances générales explicites, en plus de questions sur l'évolution de leur géométrie (Figure 1, Phase 2).

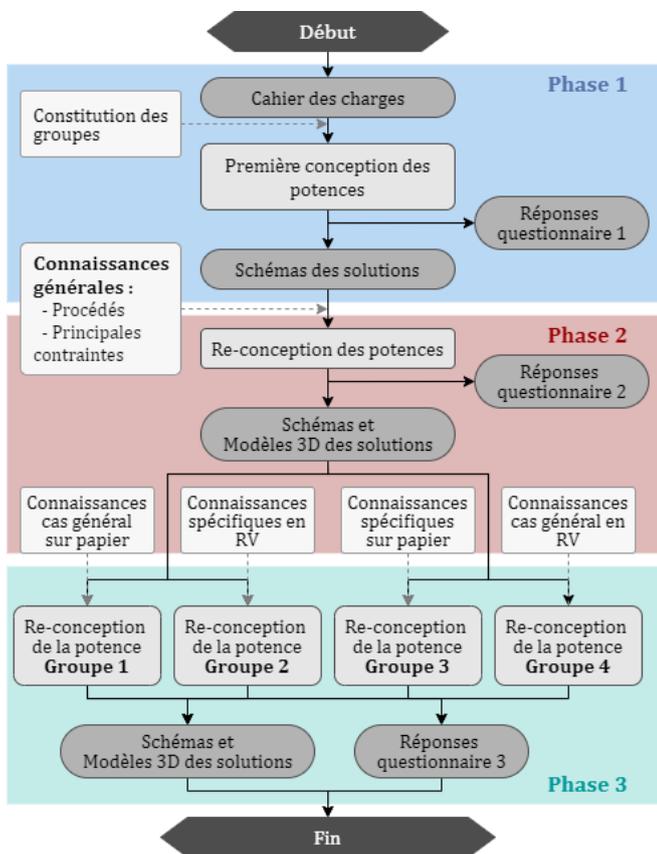


Figure 1 – Déroulement des trois phases de l'expérience

Pour la troisième phase, les quatre groupes ont accès à des informations plus spécifiques sur leur géométrie mais sous différentes formes (Figure 1, Phase 3). Deux des groupes ont des informations directement liées à leur modèle, l'un sur papier (Groupe 3) et l'autre par l'intermédiaire d'une application en RV (Groupe 2), sur un casque Oculus Quest 2. Les deux autres groupes ont les mêmes types d'informations appliquées sur un exemple similaire mais non identique au leur, ici une bielle avec des cotations différentes réalisée par optimisation topologique (Groupe 1 sur papier et Groupe 4 en RV). Pour chacun des groupes, trois types d'informations sont transmises : celles relatives à l'état de surface, à la fabricabilité, et au risque de déformation. L'approche est basée sur une démarche de formalisation de connaissance spatiotemporelle développée par les auteurs [13], appuyée sur une division par features. Discrétiser le modèle par tranches permet de mieux visualiser les problèmes qui pourraient avoir lieu lors de la fabrication, en permettant à la fois d'isoler une zone qui pourrait être améliorée grâce à un apport d'informations, tout en la visualisant dans son contexte. Dans le cas des groupes avec un support papier, une mise en plan de la bielle ainsi qu'un tableau reprenant les mêmes informations sont

fournis. Par exemple pour le cas d'étude général, le groupe 1 a à sa disposition la mise en plan de la figure 2.a ainsi que le tableau 1, alors que le groupe 4 dispose des informations du tableau mais sous forme de fenêtres liées aux tronçons correspondant de la figure 2.b qu'ils peuvent manipuler en RV. De la même manière, des informations propres à la potence du groupe 2 leur sont transmises en RV, et celles correspondant à la géométrie du groupe 3 sur papier. Tous les participants répondent finalement au troisième questionnaire proposé, visant cette fois-ci à la fois à évaluer leur ressenti sur le support de transmission et sur le type d'informations reçues.

Tableau 1 – Informations transmises aux groupes 1 et 4 pour le cas d'étude général

Titre	Description
1 <b>Etat de surface :</b> Inclinaison d'une surface	L'angle d'inclinaison d'une surface impacte fortement la qualité de surface de la pièce imprimée. En deçà de 45° d'inclinaison, l'ajout de support est nécessaire.
2 <b>Fabricabilité :</b> Trou horizontal	Un trou circulaire ayant un diamètre supérieur à 7mm ne peut être fabriqué sans l'ajout de support.
3 <b>Déformation :</b> Variation brusque	Une variation trop brusque de la surface à imprimer peut entraîner une déformation de la couche correspondante.
4 <b>Fabricabilité :</b> Porte-à-faux	Une surface en porte-à-faux ne pourra pas être fabriquée sans l'ajout de support.
5 <b>Risque de déformation :</b> Rapport de forme	Un élément dont la dimension verticale est très grande par rapport à sa section horizontale risque de se déformer lors de la fabrication.

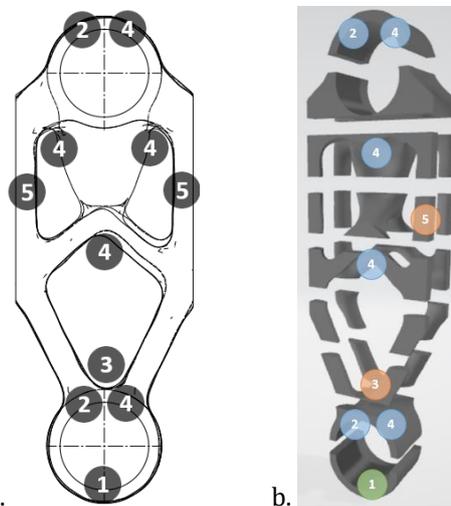


Figure 2 – Modèles fournis aux groupes 1 (a) et 4 (b)

Cette expérience permet ainsi de récolter des résultats en vue d'une double analyse quantitative et qualitative. Tout d'abord, l'évaluation des potences conçues lors de chaque phase permet de vérifier l'assimilation et le réemploi des connaissances acquises lors de chaque phase, en fonction du support et du type d'informations transmises, tout en tenant compte de l'expertise de l'enseignant. Quatorze critères d'évaluation ont été définis selon quatre catégories : le cahier des charges (réduction de la masse, rigidité de la pièce, respect des cotations, emploi de la FA justifié, prise en compte des

avantages de la FA), le risque de déformation lors de la fabrication (rapport de forme vertical, rapport de forme horizontal, angles vifs), l'état de surface anticipé en fonction de la géométrie (surfaces inclinées, minimisation du support, facilité du retrait du support), et la fabricabilité de la pièce (orientation des trous, porte-à-faux, parois fines). Dans un second temps, les réponses aux questionnaires individuels permettent d'évaluer le ressenti et les préférences des participants.

## 4. RESULTATS

### 4.1. Evolution de la géométrie proposée

A la fin de chacune des trois phases, les géométries proposées par les quatre groupes ont été évaluées et une note ramenée sur 10 points a été attribuée. Les résultats obtenus pour chaque groupe à chacune des trois phases sont présentés dans la figure 3.

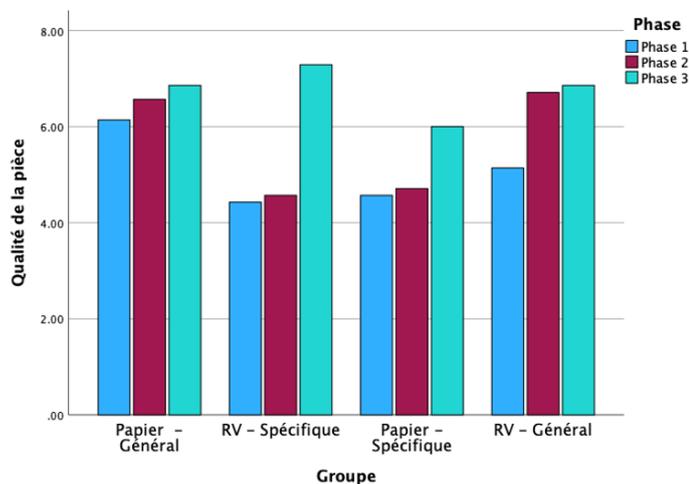


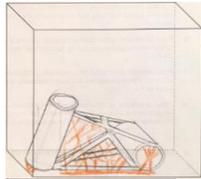
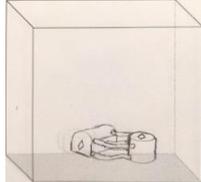
Figure 3 - Evolution de la qualité de la conception proposée par groupe pour chaque phase de l'étude

Pour chacun des groupes, une légère amélioration est observée lors du passage de la phase 1 à la phase 2. L'amélioration est particulièrement marquée sur les critères de fabricabilité : En moyenne sur les quatre groupes, la note de cette catégorie passe de 4,75 à 7 sur 15. Cela est cohérent avec l'apport de connaissances générales, puisque les critères concernés sont principalement liés à des notions de porte-à-faux et d'orientation. Cependant, une nette différence d'évolution entre les groupes est observée lors de la phase 3. Le premier groupe, qui avait un support papier et l'apport d'informations « général », maintient une progression plutôt constante entre les trois phases, avec une augmentation de 4% de la note entre les phases 2 et 3. De la même manière, le groupe 4, qui avait le même exemple et les mêmes informations mais en RV, montre une légère amélioration mais sans écart vraiment marqué avec la phase 2 (2%).

Les deux autres groupes, qui avaient les mêmes informations mais directement affichées sur la potence conçue précédemment, ont proposé une nouvelle géométrie cette fois ci beaucoup mieux adaptée à la FA,

avec une progression de 37% pour le groupe en RV et 21% pour le groupe sur papier, dont les résultats sont présentés dans le tableau 2. Même s'il n'est pas possible ici de faire une analyse inférentielle, ces données nous donnent une première indication sur les différences entre les groupes.

Tableau 2 – Schémas et notes du groupe 3

Schéma	Notes attribuées
	Cahier des charges : 24/25 Risque de déformation : 6/15 Etat de surface : 0/15 Fabricabilité : 2/15 <b>Note phase 1 : 4.57/10</b>
	Cahier des charges : 20/25 Risque de déformation : 10/15 Etat de surface : 2/15 Fabricabilité : 1/15 <b>Note phase 2 : 4.71/10</b>
	Cahier des charges : 17/25 Risque de déformation : 8/15 Etat de surface : 7/15 Fabricabilité : 10/15 <b>Note phase 3 : 6/10</b>

### 4.2. Réponses aux questionnaires

Les réponses aux questionnaires ont permis de tirer plusieurs conclusions sur l'apport de connaissances et la pertinence du support. Pour chacune des phases, l'affirmation « J'ai des connaissances suffisantes pour concevoir un objet destiné à être fabriqué par un procédé de FA. » est proposée, de manière à évaluer leur propre perception de leur niveau de connaissances. Une différence significative est observée entre chaque phase d'après le test de Friedman ( $\chi^2(2, n=18) = 20,667, p < .001$ ). Les tests paire à paire indiquent une amélioration constante (phase 1 :  $m = 2,00$  ; phase 2 :  $m = 2,67$  ; phase 3 :  $m = 3,08$ ). Cette augmentation permet de confirmer la pertinence des deux phases d'apport de connaissance, et que les informations transmises n'ont pas semblé redondantes pour les participants.

Lors des phases 1 et 2, trois propositions concernant le type d'information à transmettre ont été énoncées. Il a été demandé aux participants d'évaluer s'ils aimeraient avoir le plus de connaissances possibles sur le fonctionnement des machines de la FA, avoir le plus d'informations possibles sur des méthodes de conception pour la FA ainsi que s'ils aimeraient avoir des informations propres à la géométrie de leur produit. Les réponses obtenues sont présentées dans la figure 4 en pourcentage d'accord avec chaque proposition. Lors de la première phase, les moyennes des réponses pour ces trois affirmations sont proches, respectivement 3,58 ; 3,53 et 3,68 sur 4. En comparant ces résultats à ceux obtenus lors de la phase 2, aucune différence significative n'est observée pour le souhait d'obtenir des informations générales et des

informations propres à la géométrie proposée. Pour la seconde affirmation cependant, un test de Wilcoxon montre que le souhait des participants d'avoir accès au plus d'informations possibles sur les méthodes de conception pour la FA a tendance à baisser d'une phase à la suivante ( $z = -1,897$ ,  $p = 0,058$ ). Une façon d'interpréter ce résultat est que suite à deux phases de conception, les participants gagnent en confiance par rapport à la géométrie qu'ils proposent et estiment que les connaissances relatives aux méthodes de conception reçues sont suffisantes.

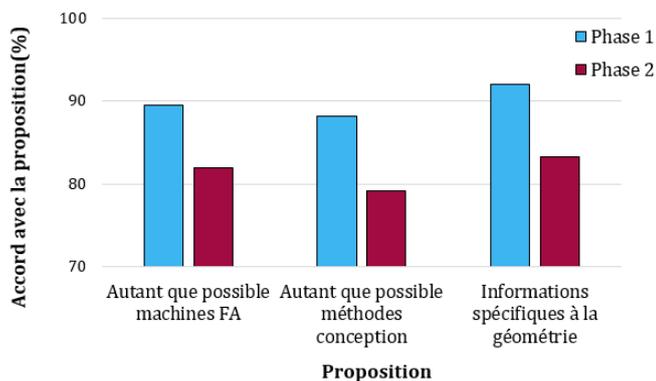


Figure 4 – Types d'informations souhaités à la fin des phases 1 et 2

En ce qui concerne la phase 3, une partie du questionnaire vise à déterminer le support optimal pour un outil d'aide à la conception. A l'affirmation « Le support fourni a facilité ma compréhension des informations qui m'ont été transmises », aucune différence significative n'est notée sur le ressenti des participants en fonction du groupe. Cependant, à la question portant sur le support qu'ils estiment qui les aiderait au mieux dans un futur projet de conception pour la FA, une plus forte disparité est observée. Les quatre réponses suivantes, appuyées par une illustration des outils, étaient proposées :

1. Fiches de règles de conception sur papier
2. Base de données en ligne de règles de conception pour la FA
3. Logiciel d'apport de connaissances sur ordinateur
4. Logiciel d'apport de connaissances sur casque de réalité virtuelle

Une préférence pour le support papier a été indiquée dans 38% des cas. Pour justifier cette préférence, les principaux arguments écrits par les participants étaient liés à l'accessibilité de l'information (ne pas avoir à changer de fenêtre lors d'un travail de CAO), au fait de pouvoir garder des traces tangibles des informations, ainsi qu'à la simplicité d'utilisation. La base de données a été préférée par 28% des participants, qui ont indiqué encore une fois apprécier l'accessibilité et la simplicité d'utilisation, ainsi que l'exhaustivité des informations disponibles. Le logiciel sur écran a été choisi par 17% des étudiants, principalement pour la visualisation, l'aide à la compréhension et la précision possible pour les informations transmises. Finalement, 17% également ont préféré la RV, à la fois pour avoir une meilleure vision de la géométrie, une plus grande immersion, ainsi qu'une

meilleure visualisation des points faibles et points forts du produit conçu.

La seconde partie du questionnaire est axée sur le type de connaissances transmises. A la question « Estimez-vous que les informations que vous avez reçues vous ont été transmises au bon moment ? » trois réponses étaient proposées. Au total, 72% des participants préfèrent recevoir uniquement des informations générales sur la FA au tout début du processus de conception, puis avoir des informations précises au fur et à mesure en fonction de l'évolution de leur géométrie, contre 22% pour avoir accès à toutes les informations possibles dès le début et 6% pour uniquement des informations au fur et à mesure.

### 4.3. Discussion

D'un point de vue de l'évolution de la géométrie, l'écart entre la phase 2 et la phase 3 est beaucoup plus marqué pour les groupes ayant des informations affichées directement sur leur géométrie par rapport aux groupes pour lesquelles les mêmes informations sont affichées sur une pièce similaire mais n'étant pas exactement la leur. Une explication possible pourrait être que les participants ont uniquement modifié leur géométrie en suivant les indications présentes sur leur modèle sans réellement les comprendre et les assimiler. Pourtant, dans le cas du groupe 2, il peut être noté que la géométrie a complètement changé, passant d'une géométrie à trois branches fines à une géométrie à une unique branche creuse avec une nette amélioration des critères de fabricabilité et de risques de déformation. Cette observation confirme que l'apport de connaissances explicites propres à la géométrie des participants n'a pas été un frein à leur créativité, et leur a permis d'assimiler les connaissances puis de les réemployer dans une solution originale. La vitesse d'assimilation de ces connaissances peut être également remarquée, les participants ont eu deux heures pour acquérir les connaissances transmises, et ont su les réemployer efficacement au cours de la même séance. En ce qui concerne les groupes ayant eu ces informations sur une pièce différente de la leur, l'écart est moindre pour ces critères, la principale amélioration étant dans les deux cas le critère « cahier des charges ». Il semblerait donc que les groupes ayant les informations directement affichées sur leur géométrie ont mieux su réemployer les informations qui leur ont été transmises, en changeant drastiquement de géométrie pour le groupe 2 ou en améliorant la géométrie précédente pour le groupe 3. L'apport d'informations directement sur les modèles découpés en features semble donc avoir favorisé une acquisition rapide des connaissances transmises.

Cette expérience présente donc des résultats intéressants, mais fait tout de même face à certaines limites. Tout d'abord, chaque groupe n'a pu expérimenter qu'un seul support lors de la phase 3 et ne peut donc pas juger de la pertinence des autres types de supports. Par ailleurs, les participants ont eu une phase de conception en autonomie avant de passer à un travail de groupe lors des phases 1 et 2. Cet aspect doit donc être pris en compte lors de l'étude des réponses aux questionnaires puisque

la communication au sein du groupe peut être vecteur d'un apport de connaissances supplémentaires qui pourrait influencer sur leur ressenti. Finalement, il est important de noter que l'expérience n'a été menée que sur quatre groupes de quatre à cinq étudiants, et sur un unique objet qui était une potence de vélo. Pour augmenter la fiabilité des résultats, il serait intéressant de reproduire cette étude sur une population plus grande, et de varier les cas d'études puisque la complexité de la pièce étudiée pourra possiblement influencer sur les résultats obtenus.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude présentée est centrée sur trois aspects de la transmission de connaissances liées à la FA lors de la conception détaillée d'un produit par des utilisateurs novices. Elle permet à la fois de comparer les types d'informations transmises, le moment adéquat pour transmettre certaines connaissances, ainsi que les supports possibles pour apporter ces informations. A partir d'un cahier des charges mais sans apport de connaissances, les étudiants ont dû concevoir une potence de vélo destinée à être produite par FA métallique. Lors de la séance suivante, des connaissances générales leur ont été apportées, puis finalement lors d'une dernière séance, des informations plus précises sur les géométries pouvant donner lieu à des déformations lors de la fabrication, à un mauvais état de surface, ou poser des problèmes de fabricabilité leur ont été transmises. Les résultats des géométries proposées par les quatre groupes lors des trois phases d'étude ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative sur l'assimilation des connaissances apportées entre la RV et le support papier. En revanche, pour des connaissances apportées identiques, il peut être observé que les groupes ayant leur propre modèle à disposition ont mieux réussi à réemployer ces connaissances, par rapports aux groupes ayant comme support un modèle différent. La discrétisation des modèles qui a été proposée a permis une localisation spatiale des informations, qui a entraîné une acquisition efficace des connaissances à transmettre.

Par conséquent, il peut être conclu qu'il existe un réel besoin de transmettre des connaissances localisées et propre à la géométrie du produit, mais que l'impact du support semble être négligeable entre la RV et un outil traditionnel lors de la conception détaillée. L'évaluation des géométries et les réponses aux questionnaires permettent de déterminer que dans le but de mettre au point un outil d'aide à la conception pour des utilisateurs non-expert en FA, un apport de connaissances général sur les procédés et contraintes est préférable avant de commencer les premières phases de conception. Une fois les premières ébauches réalisées, les participants préfèrent en majorité avoir un support permettant la transmission d'informations précises, directement sur leur géométrie, mais simple d'utilisation et facilement accessible. Le support de l'outil développé devra donc être évolutif en fonction de l'avancé de la conception pour répondre aux attentes des participants, ce qui est en

faveur d'un outil numérique. Le développement d'un tel outil implique donc une réelle nécessité de formaliser des connaissances liées à différents features en fonction de leur position au sein d'une pièce, et de les classer de manière à pouvoir y faire appel selon la géométrie d'un produit. Dans de futurs travaux, il pourrait être intéressant d'approfondir ces résultats en reproduisant l'expérience sur un plus grand nombre de groupes, en proposant d'autres cas d'études.

## RÉFÉRENCES

- [1] Gupta, S.K., Regli, W.C., Das, D., & Nau, D.S. Automated manufacturability analysis: A survey. *Research in Engineering Design* 9, 168-190, 1997.
- [2] Molcho, G., Zipori, Y., Schneur, R., Rosen, O., Goldstein, D., & Shpitalni, M. Computer aided manufacturability analysis: Closing the knowledge gap between the designer and the manufacturer. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 153-158, 2008.
- [3] Shi, Y., Zhang, Y., Baek, S., De Backer, W., & Harik, R. Manufacturability analysis for additive manufacturing using a novel feature recognition technique. *Computer-Aided Design and Applications*, 15:6, 941-952, 2018.
- [4] Grandvallet, C., Pourroy, F., Prudhomme, G., & Vignat, F. From elicitation to structuring of additive manufacturing knowledge. *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*, Vol. 6: Design Information and Knowledge. Vancouver, Canada, pp. 141-150, 2017.
- [5] Rieuf, V., Bouchard, C., Meyrueis, V., & Omhover, J. Emotional activity in early immersive design: Sketches and moodboards in virtual reality. *Design Studies*, 48, 43-75, 2017.
- [6] Stelzer, R., Steger, W., & Petermann, D. The VR Session Manager: A Tool to Co-Ordinate a Collaborative Product Development Process in a Virtual Environment. *32nd Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B. ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Chicago, Illinois, USA: American Society of Mechanical Engineers, pp. 1517-1525, 2012.
- [7] Milton, N. R. *Knowledge Acquisition in Practice: A Step-by-step Guide*. 2007.
- [8] Nonaka, I., Takeuchi, H. The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation. *Long Range Planning*, 29(4), 1996.
- [9] Laverne, F. *Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique*. PhD thesis, 2016.
- [10] Vorkapic, N., Pjevic, M., Popovic, M., Slavkovic, N. & Zivanovic, S. An additive manufacturing benchmark artifact and deviation measurement method. *J Mech Sci Technol* 34, 3015-3026, 2020.
- [11] Wolfartsberger, J. Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review. *Automation in Construction* 104, pp. 27-37, 2019.
- [12] Ostrander, J. K., Tucker, C. S., Simpson, T. W., and Meisel, N. A. Evaluating the Use of Virtual Reality to Teach Introductory Concepts of Additive Manufacturing. *ASME. J. Mech. Des.* May 2020; 142(5): 051702, 2019.
- [13] Douin, C., Gruhier, E., Kromer, R., Christmann, O., Perry, N. A method for design for additive manufacturing rules formulation through Spatio-temporal process discretization. *Procedia CIRP*, 32nd CIRP Design Conference, 2022.

# Conception des surfaces minimales triplement périodiques à densité variable pour la fabrication additive

E. A. Ramírez <sup>a,\*</sup>, N. Béraud <sup>a</sup>, F. Pourroy <sup>a</sup>, F. Villeneuve <sup>a</sup>, M. Museau <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP\*, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

\* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

\* e-mail : emilio-adrian.ramirez-salazar@grenoble-inp.fr

## 1. INTRODUCTION

Les matériaux cellulaires, caractérisés par un réseau connecté de cellules unitaires, peuvent être configurés pour créer des structures robustes avec un changement significatif de leur comportement comparé à celui de leur matériau constitutif [1]. Il a été montré que les conséquences de la topologie de ces constructions cellulaires sont plus importantes que le matériau constitutif. Des matériaux cellulaires à gradient fonctionnel (*Functionally Graded Cellular Materials* : FGCM) peuvent être obtenus en changeant leur propriété progressivement dans l'espace, soit par une modification de la composition ou de la microstructure du matériau en mélangeant des matières premières différentes au cours de la fabrication [2], soit par une distribution optimisée de la densité relative des cellules unitaire dans l'espace de conception [3].

En particulier, les FGCM à densité variable présentent une plus grande efficacité du matériau [4] et de meilleures capacités d'absorption d'énergie [5], [6] que leurs homologues uniformes. La conception de ce type de structure est généralement liée à l'application d'une carte de densité issue d'une démarche d'optimisation topologique (TO) [7].

Les travaux antérieurs sur les FGCM se concentrent principalement sur les cellules unitaires à base de poutres (*strut-based*) [8], mais ces géométries impliquent des difficultés de fabrication et présentent des concentrations de contraintes importantes à la liaison des poutres. Pour surmonter ces problèmes, l'utilisation de FGCM basés sur des surfaces minimales triplement périodiques (*Triply Periodic Minimal Surfaces* : TPMS) est un sujet de recherche d'actualité du fait de leur capacité à créer des matériaux avec des composantes continues et interconnectées [9].

Même si certains logiciels commerciaux permettent de générer des structures TPMS à densité graduelle [10], les possibilités sont limitées aux gradients linéaires. De plus, sur la base de la littérature disponible, il n'existe pas de procédure de modélisation formelle pour développer des structures TPMS avec une densité variable, tout en étant capable de contrôler l'épaisseur des motifs et la longueur des cellules unitaires en fonction d'une carte de densité tridimensionnelle.

En outre, la littérature sur les structures à densité constante utilise un processus de projection des sommets des maillages le long des vecteurs normaux pour attribuer une épaisseur à un maillage central représentant la forme fondamentale du TPMS [9], [11]. Cependant, cette stratégie peut produire des maillages avec des auto-intersections et/ou des bords de facettes courts, qui proviennent de problèmes dans les opérations booléennes pour la création de motifs denses. Ces problèmes de maillage doivent être traités par des procédures supplémentaires de réparation de maillage. Cependant, ces procédés nécessitent un logiciel spécialisé dans le traitement des maillages, et une procédure standardisée ne peut être établie en raison de la localisation incertaine de ces problèmes.

Par conséquent, une méthodologie de conception est proposée pour la conception de TPMS à densité graduelle, en considérant une variation indépendante ou simultanée de l'épaisseur du motif et de la longueur de la cellule unitaire. En particulier, une nouvelle procédure de modélisation pour des scénarios de variation de longueur est proposée. Une procédure alternative pour créer les épaisseurs des modèles est introduite, consistant en une transformation de la forme fondamentale en un champ de distances signées (*Signed Distance Field* : SDF), qui résout les problèmes d'auto-intersections des maillages.

La méthodologie de conception décrite dans ce papier a été élaborée pour les TPMS Primitif et Gyroïde, à partir de travaux antérieurs des auteurs [12]–[14]. Le papier donne tout d’abord les généralités sur les structures TPMS, puis détaille la méthodologie proposée et son application dans un cas d’étude. Il se conclue par quelques éléments de conclusion et les perspectives en cours d’étude.

## 2. SURFACES MINIMALES TRIPLEMENT PERIODIQUES

Une surface minimale triplement périodique est caractérisée par une courbure moyenne nulle en tout point, ce qui minimise localement l’aire, et s’étend périodiquement dans trois directions indépendantes sans auto-intersections. La mise en œuvre de TPMS pour remplir des produits est intéressante car leurs propriétés topologiques permettent un support entre les couches présentant des avantages de fabrication par rapport aux treillis basés sur des poutres [15].

En tant que surfaces définies mathématiquement, les TPMS sont généralement définies par des équations implicites. Dans le contexte de cette étude, l’équation (1) et l’équation (2) détaillent les fonctions pour les motifs Primitif et Gyroïde, respectivement. Le facteur de dilatation  $\lambda = 2\pi/L$ , définit la périodicité du motif en fonction de la longueur  $L$  d’une cellule unitaire cubique. Les deux topologies TPMS étudiées sont représentées sur la Figure 1.

$$f_P(x, y, z) = \cos(\lambda x) + \cos(\lambda y) + \cos(\lambda z) \quad (1)$$

$$f_G(x, y, z) = \cos(\lambda x) \sin(\lambda y) + \cos(\lambda y) \sin(\lambda z) + \cos(\lambda z) \sin(\lambda x) \quad (2)$$

## 3. METHODOLOGIE DE CONCEPTION

La méthodologie proposée pour les structures TPMS à gradient fonctionnel est représentée sur la Figure 2. Elle comprend : (i) la définition des spécifications de conception, (ii) la création d’une carte de densité, (iii) le calcul des paramètres de conception, (iv) la génération de la surface fondamentale, (v) la création des surfaces de la structure, (vi) la génération finale du STL et (vii) les opérations de validation de la conception. Les sections ci-dessous détaillent le process de chaque étape principale.

### 3.1. Spécifications de conception

La procédure de conception commence par la définition des données d’entrée et certaines opérations préliminaires, dont :

- Le domaine de conception (*Design Space* : DS), défini comme le volume enveloppe qui doit être rempli par la structure TPMS.
- La distribution de densité en valeur et position, obtenue par calcul élément fini (FEA) ou TO à partir du modèle CAO.
- Le pas souhaité de la carte de densité pour le *re-mapping* des données de références FEA ou TO.

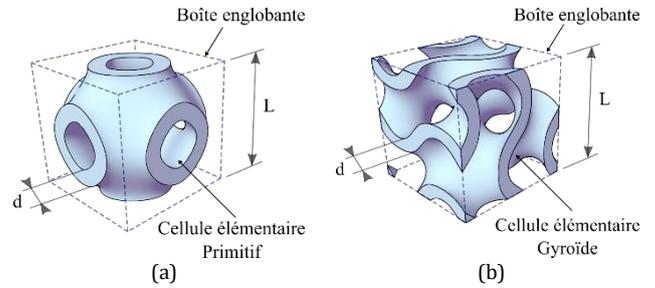


Figure 1 – Topologies à épaisseur constante pour les structures TPMS (a) Primitif et (b) Gyroïde.

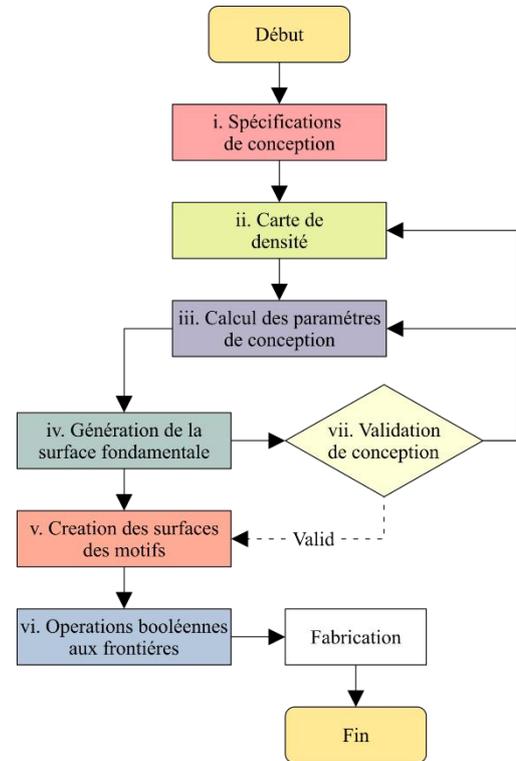


Figure 2 – Méthodologie de conception pour les structures TPMS à gradient fonctionnel.

- La sélection du type de TPMS, définissant la forme de la cellule utilisée pour le modèle.
- La taille de référence du voxel et les itérations de subdivision à effectuer pour discrétiser le domaine de conception avec l’algorithme de polygonisation.
- Le scénario de variation de densité : c.-à-d. un modèle à densité constante ou à densité variable par l’épaisseur, la longueur ou la variation simultanée de longueur et d’épaisseur.
- Différents paramètres de conception, fonction du scénario de variation de densité, comme la valeur de longueur et d’épaisseur ou leurs limites, la plage de densité et le point de départ de la génération de la surface.

### 3.2. Carte de densité

La carte de densité (*Density Map* : DM) est créée à partir des données de référence, de leur emplacement dans le DS et du pas souhaité de la DM. En raison de la nature discrète de l’algorithme de polygonisation pour la génération du maillage STL, la condition principale est d’avoir une DM représentée par une grille régulière.

Si la distribution de densité de référence est obtenue à partir de TO, les valeurs et leurs emplacements sont transmis directement aux sous-processus de *re-mapping*. Pour les valeurs de référence provenant de données FEA sous forme de contraintes de Von Mises, les densités locales doivent être calculées par l'application des modèles de Gibson-Ashby reliant la densité relative aux propriétés mécaniques relatives. La définition de ces modèles n'entre pas dans le cadre du présent document. Cependant, des exemples peuvent être trouvés dans la littérature [12].

L'exigence d'une grille uniforme est satisfaite en effectuant un *re-mapping*, au sein du DS, de la distribution de densité issue de TO ou de FEA. La procédure de calcul d'une densité  $\rho_m^*$  sur la grille uniforme consiste en une somme pondérée de  $r$  nœuds de densité de référence  $\rho_i^*$ . Les coefficients de pondération sont calculés comme l'inverse des distances au carré, comme détaillé dans l'équation (3) et l'équation (4). Dans ces équations,  $\omega_i$  représente la distance entre un point de la grille remappée et un nœud de la grille de référence.  $\Omega$  est défini comme la somme de l'inverse des distances au carré d'un point de la grille remappée aux  $r$  nœuds de référence considérés. L'utilisation des distances au carré a été choisie en raison des avantages computationnels de leur calcul pour les distances entre points dans le langage C# utilisé pour la programmation.

$$\rho_m^* = \sum_{i=1}^r \rho_i^* \frac{\omega_i^2}{\Omega} \quad (3)$$

$$\Omega = \sum_{i=1}^r \frac{1}{\omega_i^2} \quad (4)$$

Pour ce processus, les paramètres *Sensitivity* et *Tolerance* sont définis. *Sensitivity* représente la taille maximale de la zone où rechercher les points de référence pour calculer la densité locale. Il est défini comme la plus grande des distances entre deux points de la grille remappée et de la grille de référence. Les deux distances de grille sont comparées car le *re-mapping* peut être effectué à partir d'une distribution de densité dense ou à partir de quelques valeurs de densité représentatives. D'autre part, *Tolerance* définit la zone maximale à l'intérieur de laquelle une densité locale est fixée sans utiliser la somme pondérée. Ce paramètre devrait être inférieur à la moitié de la distance minimum entre deux points de la grille remappée et de la grille de référence. Ainsi, la zone définie par la valeur *Tolerance* ne peut contenir au maximum qu'un seul point de référence.

La Figure 3 montre les zones définies par les valeurs de *Sensitivity* et *Tolerance*. Par exemple, la valeur de la densité du point bleu au centre de la zone de gauche sera fixée directement à la valeur du point rouge situé à l'intérieur de la zone *Tolerance*, sans tenir compte des densités des points de référence voisins.

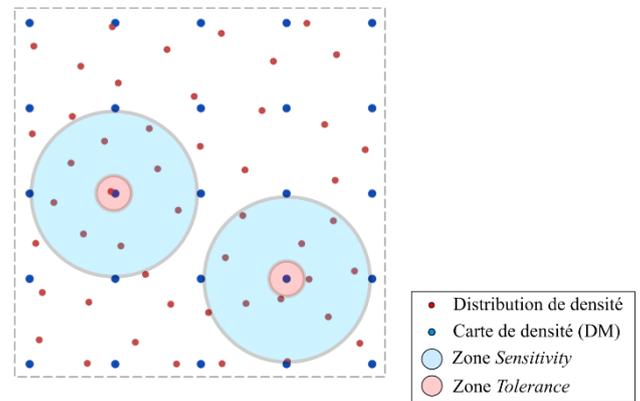


Figure 3 - Représentation des zones *Sensitivity* et *Tolerance* pour le calcul de la densité locale.

En revanche, la densité du point bleu au centre de la zone de droite est calculée par la somme pondérée des densités des points rouges à l'intérieur de la zone *Sensitivity*, car aucun point rouge n'est présent dans la zone *Tolerance*.

### 3.3. Calcul des paramètres de conception

Après la détermination de la DM, les paramètres de conception sont calculés en fonction du scénario de variation de densité et du type de TPMS. Le ratio épaisseur/longueur ( $d/L$ ) est déterminé en fonction de la densité relative, comme défini par [13]. Afin d'avoir un processus générique, ce ratio est calculé indépendamment du scénario de variation de densité spécifié. Il est utilisé pour obtenir la distribution spécifique de l'épaisseur et des longueurs dans les étapes ultérieures. Comme le ratio dépend à la fois de l'épaisseur  $d$  et de la longueur  $L$  de la cellule unitaire, les valeurs de longueur sont d'abord calculées, puis utilisées pour trouver l'épaisseur correspondante. Dans le cas d'un scénario à longueur constante, la carte des épaisseurs est déterminée en multipliant la longueur par les valeurs locales du ratio. De même, une longueur variable avec une épaisseur constante est obtenue en divisant l'épaisseur par la valeur locale du ratio.

Pour un scénario de variation simultanée de la longueur et de l'épaisseur, les valeurs de longueur sont calculées en fonction du ratio local. Ainsi, les zones présentant un ratio élevé (densité plus forte) sont associées à des valeurs de longueur faibles, tandis que les zones présentant un ratio faible (faible densité) sont associées à des valeurs de longueur importantes. Ce processus suppose une dépendance linéaire entre le ratio et l'inverse de la longueur, comme défini par l'équation (5). La plage des valeurs de longueur à utiliser doit être déterminée en fonction de la dimension globale de la pièce.

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_{min}} + \left( \frac{1}{L_{max}} - \frac{1}{L_{min}} \right) \left( \frac{ratio_{max} - ratio}{ratio_{max} - ratio_{min}} \right) \quad (5)$$

Après la définition de la carte des épaisseurs et longueurs à partir de la DM, les étapes suivantes de la méthodologie effectuent un deuxième *mapping* par

interpolation, en fonction de la taille des voxels du domaine de conception (DS). Cette étape est nécessaire car en général une génération correcte de la surface du TPMS nécessite une grande densité de points.

### 3.4. Génération de la surface fondamentale

En utilisant un algorithme de *Marching Tetrahedra* (MT), une polygonisation en maillage STL de la forme de base des constructions à densité variable est générée comme détaillé par [14] suivant la distribution de longueur requise (variable ou constante). Étant donné la nature discrète de la méthode de polygonisation, les courbures des surfaces générées sont fortement influencées par la taille des voxels. Une bonne approximation d'une surface nécessite qu'un segment de droite représentant une section de courbe ne s'étende pas sur un secteur circulaire de plus de  $15^\circ$ . Cela entraîne une erreur d'approximation du rayon  $\varepsilon/R$  de 0,85%, selon la géométrie représentée sur la figure 4. Ainsi, le segment de droite, considéré comme analogue à la taille du voxel, est définie par le facteur de longueur  $h$  de l'équation (6) en fonction du rayon de la section de courbe.

$$h = 2R \sin\left(\frac{15}{2}\right) \quad (6)$$

Le rayon effectif  $R_f$  de la section circulaire pour la génération de la forme fondamentale dépend de la topologie des pores de la projection latérale de la forme fondamentale du TPMS, comme présenté sur la figure 5. En raison des caractéristiques géométriques du TPMS, ces pores ne sont pas nécessairement circulaires. Cependant, à des fins de calcul, les pores sont associés à un cercle de diamètre  $D = L/4$  qui s'inscrit dans leur topologie. Par conséquent, la valeur correspondante de  $R_f$  est égale à  $1/8$  de la longueur de la cellule unitaire pour les modèles Primitifs et Gyroïdes.

L'algorithme MT génère le maillage STL à partir de l'évaluation de la fonction TPMS sur chaque coin des voxels représentant le DS. Comme la voxélisation du DS peut être une opération informatiquement lourde, un processus de raffinement itératif par subdivision des voxels et de nettoyage des voxels inutilisés est mis en place, comme illustré sur la Figure 6.

Pour un cas de modélisation général, le processus fonctionne avec une taille de voxel initiale et un certain nombre d'itérations pour obtenir le  $h$  requis calculé à partir du  $L$  minimum des longueurs cartographiées. Ensuite, un processus de raffinement des voxels est envisagé afin de subdiviser de manière itérative les voxels situés près de la forme fondamentale et de nettoyer les voxels inutilisés.

L'identification des voxels utiles est effectuée en analysant le changement de signe de leurs valeurs d'angle, celle-ci indique la présence d'une interface entre les régions de surface intérieure et extérieure. Enfin, l'ensemble des voxels raffiné est traité par l'algorithme MT chargé de la création des facettes triangulaires pour représenter la forme. Les détails de ce processus sont présentés ci-après.

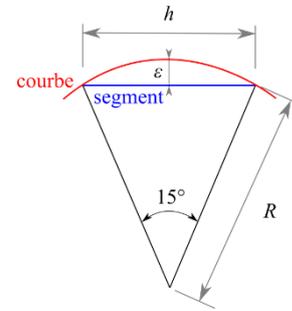


Figure 4 - Définition du facteur de longueur des voxels.

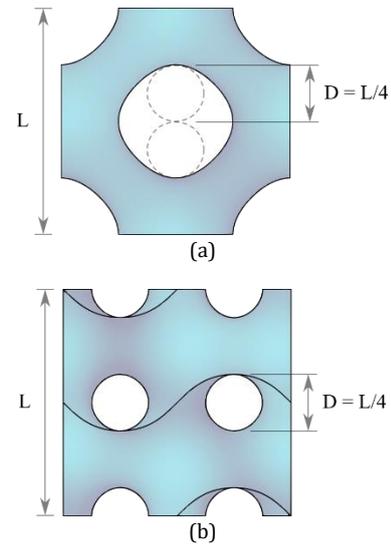


Figure 5 - Projection latérale pour les TPMS (a) Primitif et (b) Gyroïde.

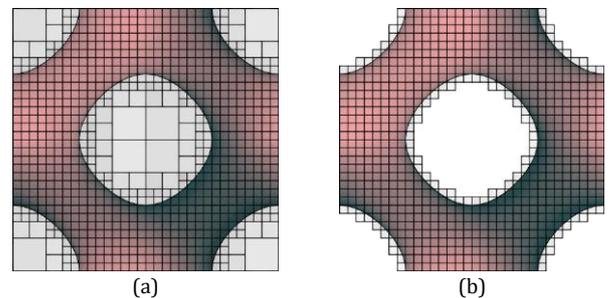


Figure 6 - Traitement des voxels : (a) Subdivision et (b) nettoyage.

### 3.5. Création des surfaces des motifs

L'étape suivante de la création de la surface du motif consiste à déplacer la forme fondamentale en utilisant l'épaisseur requise (variable ou constante). Ce processus est principalement réalisé par un processus de décalage par SDF pour définir les surfaces intérieures et extérieures et une reconstruction du maillage par un algorithme MT.

Contrairement à la dernière étape de génération de formes fondamentales, la taille de voxel requise pour la création de surfaces de motifs par décalage SDF doit à la fois permettre une bonne représentation de la courbure de la surface, et être suffisamment petite pour détecter l'épaisseur du motif. Par conséquent, une valeur de rayon corrigée est établie par  $R_{SDF} = L/8 - d/2$ , qui tient compte de la réduction des diamètres projetés due à l'épaisseur locale.

Une première itération de la représentation du DS voxélisé est obtenue à partir d'une taille de voxel cible initiale. La voxélisation du DS est ensuite ajustée en fonction des valeurs d'épaisseur interpolées aux coins du voxel. Ainsi, le décalage par SDF est trouvé en ajoutant ou en soustrayant simplement la moitié de l'épaisseur locale. Le processus se termine par l'exécution de l'algorithme MT sur le SDF (intérieur et extérieur) décalé pour créer les maillages STL des surfaces du motif.

### 3.6. Opérations booléennes aux frontières

Les fichiers générés par les processus précédents sont des maillages STL ouverts représentant les surfaces intérieures et extérieures du motif TPMS à gradient. Le modèle fermé final avec les motifs TPMS est obtenu par une série d'opérations booléennes sur le maillage entre les surfaces du motif et les frontières de l'espace de conception ou la forme finale de la pièce.

Ces étapes sont souvent spécifiques à chaque cas et le développement d'un outil de conception personnalisé (comme pour les autres processus) n'était pas au centre de ces recherches. Cependant, pour le développement des constructions volumique (fermées) présentées dans les sections suivantes, le traitement STL a été effectué sur la suite de CAO SpaceClaim® 2020 R2. La chaîne de traitement comprenait une combinaison de nettoyage et de soustraction des facettes pour corriger les erreurs potentielles de maillage avant de calculer l'intersection des régions.

### 3.7. Evaluation des constructions à densité variable

Un processus itératif supplémentaire de validation de la conception est envisagé pour l'évaluation de la structure générée par des méthodes éléments finis. L'analyse par éléments finis nécessite la conversion du maillage STL de la forme fondamentale en éléments finis de type coque ainsi que l'attribution d'une épaisseur locale à chaque nœud des éléments coques. Pour cela, deux outils supplémentaires ont été développés pour créer l'ensemble des instructions pour l'importation du maillage éléments finis et l'assignation d'une épaisseur variable en tant que commandes APDL pour une analyse grâce au module d'analyse statique des structures du logiciel ANSYS® Workbench, Release 2020 R2.

Dans le cas d'une réponse insatisfaisante de la structure cellulaire (contrainte excessive ou déformation en dehors des conditions de travail), un processus de raffinement et d'amélioration de la forme et de la distribution de la densité est nécessaire. Cela peut se faire soit en ajustant les plages de densité utilisées dans les procédures de *mapping* de la densité, soit en modifiant les valeurs des paramètres de conception dans les processus de calcul des paramètres de conception. Une fois la conception validée, le processus se poursuit avec la création des surfaces de motifs et les opérations booléennes aux frontières pour créer un modèle solide, en fonction des exigences du concepteur.

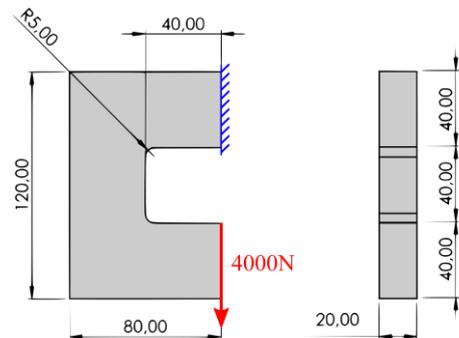


Figure 7 - Étude de cas d'une "pièce en C".

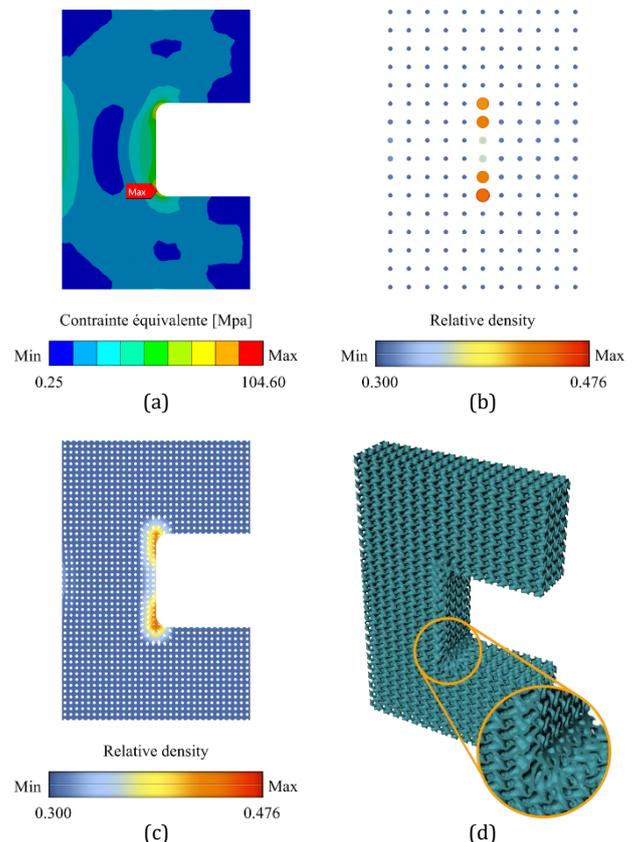


Figure 8 - Illustration des étapes de la méthode proposée : (a) Étude FEA préliminaire, (b) carte de densité, (c) génération de la surface fondamentale, et (d) modèle géométrique final.

## 4. ETUDE DE CAS

La méthode de conception proposée est illustrée au travers d'une étude de cas : la conception d'une « pièce en C » remplie par FGCM de type Gyroïdes, offrant simultanément des variations de longueur et d'épaisseur (Figure 7). La procédure de création de la carte de densité est ici basée sur une étude FEA préliminaire, avec un matériau de module de Young égal à 114GPa, et de coefficient de Poisson 0,33, la pièce étant soumise à une charge de 4000N. Le dimensionnement se base sur un déplacement maximum admissible de 2mm au niveau de l'extrémité chargée, et une contrainte limite fixée à 550MPa.

La Figure 8 rassemble des images successives du processus de conception. Telle que présentée sur la Figure 8b, la carte de densité a été obtenue à partir d'une grille de pas égal à 8mm, et présente un intervalle de

densité relative compris entre 0,30 et 0,476 à partir des résultats d'une analyse FEA préliminaire (Figure 8a). Même si cette carte de densité réduit le nombre de points par rapport aux résultats FEA de référence, la surface fondamentale de la Figure 8c est bien en accord avec les densités locales représentées par les différentes couleurs.

Le modèle géométrique final de la Figure 8d présente une distribution de cellules unitaires d'une épaisseur comprise entre 0,50 et 0,64mm, et de longueurs comprises entre 4 et 5mm. Il correspond à une masse totale de 230g, ce qui représente 32% de la masse du volume plein. L'évaluation du modèle proposé et le processus itératif ayant conduit à ce modèle ne sont pas détaillés ici pour une question de place, le déplacement total maximum obtenu s'élève à 1,81mm au niveau de l'extrémité chargée, ce qui reste bien dans les limites fixées.

## 5. CONCLUSIONS

La méthode de conception proposée s'avère donc capable de manipuler des distributions de matière tridimensionnelles pour créer des FGCM basés sur des TPMS d'épaisseur variable, de longueur variable, ou de variation simultanée de ces deux paramètres. La démarche s'appuie sur un ensemble de paramètres définis par le concepteur, intégrant notamment le type de TPMS souhaité et le scénario de modélisation géométrique. La carte de densité est définie à partir d'une TO ou bien d'une simple analyse FEA sur le DS.

La nature discrète de l'algorithme de polygonisation utilisé pour générer la surface TPMS fondamentale conduit à représenter la distribution de densité suivant une grille régulière. Cependant, les points de densité locale obtenus par FEA ou TO ne coïncident généralement pas avec une grille régulière, et il est nécessaire de procéder à une projection de cette carte de densité initiale sur la grille régulière requise.

A partir de la surface fondamentale, une procédure alternative de décalage de maillage central est utilisée pour générer les surfaces internes et externes du volume. Elle consiste à transformer la surface fondamentale à partir d'un scalaire SDF. Cette procédure de décalage de champ est indépendante de la forme de la surface et permet de résoudre des problèmes d'auto-intersection issus de la méthode classique de projection de maillage par les vecteurs normaux nodaux.

Toutes les étapes de la démarche proposée ont été implémentées en tant que plug-in utilisateur dans le composant Grasshopper® de la suite CAO Rhinoceros® 7. Bien que des exemples de modèles à densité variable n'aient été présentés que pour des TPMS de type Primitive ou Gyroïde, la démarche peut gérer tout type de forme à surface minimale à partir de son équation de surface et de ses caractéristiques de densité relative en fonction des paramètres géométrique de la cellule. Au final, la méthode proposée doit être utilisée en combinaison d'une analyse de fabricabilité relative à la technologie additive employée.

## REMERCIEMENTS

Ce travail est soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche, France, dans le cadre du projet ANR BeShape [numéro de subvention ANR-18-CE10-0014-01].

## REFERENCES

- [1] T. Maconachie *et al.*, 'SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges', *Materials & Design*, vol. 183, p. 108137, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108137.
- [2] M. Ansari, E. Jabari, and E. Toyserkani, 'Opportunities and challenges in additive manufacturing of functionally graded metallic materials via powder-fed laser directed energy deposition: A review', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 294, p. 117117, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117117.
- [3] L. Yang, R. Mertens, M. Ferrucci, C. Yan, Y. Shi, and S. Yang, 'Continuous graded Gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: Design, manufacturing and mechanical properties', *Materials & Design*, vol. 162, pp. 394–404, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2018.12.007.
- [4] I. Maskery *et al.*, 'An investigation into reinforced and functionally graded lattice structures', *Journal of Cellular Plastics*, vol. 53, no. 2, pp. 151–165, Mar. 2017, doi: 10.1177/0021955X16639035.
- [5] S. Y. Choy, C.-N. Sun, K. F. Leong, and J. Wei, 'Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting', *Materials & Design*, vol. 131, pp. 112–120, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.06.006.
- [6] D. Li, W. Liao, N. Dai, and Y. M. Xie, 'Comparison of Mechanical Properties and Energy Absorption of Sheet-Based and Strut-Based Gyroid Cellular Structures with Graded Densities', *Materials*, vol. 12, no. 13, p. 2183, Jan. 2019, doi: 10.3390/ma12132183.
- [7] D. Li, W. Liao, N. Dai, G. Dong, Y. Tang, and Y. M. Xie, 'Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing', *Computer-Aided Design*, vol. 104, pp. 87–99, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.cad.2018.06.003.
- [8] D. S. J. Al-Saedi, S. H. Masood, M. Faizan-Ur-Rab, A. Alomarah, and P. Ponnusamy, 'Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM', *Materials & Design*, vol. 144, pp. 32–44, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.01.059.
- [9] D. W. Abueidda, M. Elhebeary, C.-S. (Andrew) Shiang, S. Pang, R. K. Abu Al-Rub, and I. M. Jasiuk, 'Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study', *Materials & Design*, vol. 165, p. 107597, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107597.
- [10] O. Al-Ketan and R. K. A. Al-Rub, 'MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces', *Material Design & Processing Communications*, vol. n/a, no. n/a, p. e205, 2020, doi: 10.1002/mdp.2.205.
- [11] L. Zhang *et al.*, 'Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading', *Additive Manufacturing*, vol. 23, pp. 505–515, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.08.007.
- [12] E. A. Ramírez, N. Beraud, F. Pourroy, F. Villeneuve, and M. Museau, 'Equivalent Material analysis of Triply Periodic Minimal Surfaces', *Proceedings of the 25ème Congrès Français de Mécanique (CFM 2022)*, 2022.
- [13] E. A. Ramírez, N. Béraud, F. Pourroy, F. Villeneuve, and M. Museau, 'Design parameters effects on relative density of triply periodic minimal surfaces for additive manufacturing', *Procedia CIRP*, vol. 100, pp. 13–18, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.05.002.
- [14] E. A. Ramírez, N. Beraud, F. Pourroy, F. Villeneuve, and M. Museau, 'A design methodology for graded density triply periodic minimal surfaces', *Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering and Advanced Manufacturing (JCM 2022)*, 2022.
- [15] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, P. Young, and D. Raymont, 'Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting', *Materials & Design*, vol. 55, pp. 533–541, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.10.027.

# Conception pour l'impression 4D multi-matériaux : vers la génération de polyvoxels emboîtés

K. Benyahia<sup>a</sup>, H. Seriket<sup>a</sup>, S. Gomes<sup>a</sup>, J.C. André<sup>b</sup>, F. Demoly<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> ICB UMR 6303 CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, Belfort, France

<sup>b</sup> LRGP UMR 7274 CNRS, University de Lorraine, Nancy, France

\* e-mail : Frederic.demoly@utbm.fr

## 1. INTRODUCTION

Depuis toujours, les approches de conception et les technologies de fabrication ont connu une évolution constante pour donner naissance à des objets innovants. La fabrication additive (FA) est un exemple parfait pour illustrer cette évolution. Cette technologie a suscité un intérêt exponentiel dans plusieurs domaines, ce qui a donné lieu à des innovations progressives et perturbatrices. L'impression 4D est l'une des innovations liées à la FA visant à combiner les techniques de FA et les matériaux intelligents (SMs) [1-3]. Elle permet de construire des objets intelligents dont la forme, la fonctionnalité ou les propriétés peuvent être modifiées en présence d'une stimulation énergétique telle que l'humidité, la chaleur, la lumière, le pH, etc. [1-4]. Considérée comme un domaine de recherche interdisciplinaire, l'impression 4D ouvre de nombreuses perspectives et suscite l'intérêt du monde universitaire aussi bien que de l'industrie [2,3,5]. Parmi les nombreuses études existantes dans la littérature, on peut remarquer que l'impression 4D peut être abordée par le biais d'un dépôt d'un matériau unique ou de plusieurs matériaux [4,6,7].

Bien que les deux directions méritent toute l'attention nécessaire pour améliorer les connaissances en termes d'impression 4D, il est important de répondre aux besoins industriels concernant les comportements physiques, la réversibilité et la réactivité, pour n'en citer que quelques-uns. À cet égard, l'impression 4D multi-matériaux offre une plus grande liberté dans l'ingénierie de conception de composites actifs qui présentent des propriétés à la fois structurelles et souples. Des études récentes sur l'impression 4D multi-matériaux ont mis en évidence la possibilité de calculer les distributions de matériaux dans une structure 3D en utilisant des technologies basées sur l'intelligence artificielle (IA), les matériaux numériques et la modélisation basée sur les voxels [1,8]. L'objectif de ces calculs est d'allouer le bon matériau (passif ou actif) au

bon endroit et le bon stimulus au bon moment, afin d'obtenir le changement de forme souhaité et des performances mécaniques optimales [1,8]. Cependant, les structures avec des distributions numériques de matériaux résultant des calculs sont compliquées à imprimer avec les techniques de FA disponibles, ainsi le développement de nouvelles stratégies de FA multi-matériaux est nécessaire. Une approche originale consiste à utiliser des assemblages par emboîtement de blocs ou polyvoxels (constitués de plusieurs voxels) de différents matériaux imprimés avec différentes techniques de FA [1,9,10]. Diverses méthodes d'assemblage par emboîtement sont explorées dans la littérature : mécanique, bio-inspirées et computationnelles [1]. Parmi les méthodes susmentionnées, l'emboîtement mécanique assisté par ordinateur offre plus de liberté en termes de combinaison de matériaux et de procédés FA. Il s'agit de partitionner des structures tridimensionnelles en éléments imbriqués, comme des blocs 3D de type puzzle, afin de contourner les limites de l'impression de larges pièces et/ou de la FA multi-matériaux [1,5]. Bien que de nombreuses études ont été réalisées sur la génération computationnelle d'assemblages 3D emboîtés, on dispose de très peu de connaissances sur l'impression 4D multi-matériaux en termes de distributions numériques de matériaux résultants d'algorithmes génétiques et de techniques basées sur l'IA.

À cet égard, l'objectif principal de cet article est de proposer une approche de conception computationnelle dédiée à l'impression 4D multi-matériaux utilisant l'assemblage par emboîtement de blocs discrets 3D de type puzzle. Le point de départ est une distribution numérique de matériaux dans une structure 3D/4D, à laquelle un sous-ensemble de blocs emboîtés – destinés à être imprimés individuellement puis assemblés – est déterminé pour construire n'importe quelle structure à base de voxels comprenant des éléments solides et/ou en treillis [1,11,12]. Par la présente, un algorithme est

développé pour déterminer des arrangements judicieux de blocs assurant le maintien de l'assemblage sans dépendre des moyens d'assemblage supplémentaires. De cette manière, l'approche proposée fournit une méthode d'assemblage par emboîtement efficace qui n'est pas encore réalisée dans la littérature. Une représentation basée sur les voxels et un plugin de conception assistée par ordinateur (CAO) approprié à l'impression 4D multi-matériaux, sont adoptés dans le travail de recherche, afin de contrôler adéquatement la géométrie de la pièce en termes de propriétés et d'occupations des régions actives et inertes.

## 2. DEVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME POUR LA GENERATION DE POLYVOXELS EMBOITES

Comme le montre la Figure 1, la génération de l'assemblage de blocs emboîtés se déroule en quatre étapes principales :

- Partitionnement d'une structure multi-matériaux à base de voxels en des ensembles de voxels homogènes (même matériau) après analyse de la distribution numérique des matériaux dans la structure donnée.
- Détermination du ou des degrés de liberté (DDL) et des relations de blocage des ensembles de voxels identifiés lors de la première étape (en faisant appel à des modèles mathématiques).
- Calcul de l'assemblage des blocs emboîtés en déterminant d'abord les blocs clés (dernières pièces à insérer dans l'assemblage), puis les blocs fixes.
- Planification de la séquence d'assemblage des blocs.

### 2.1. Etape 1: Partition de la distribution des matériaux numériques

L'objectif principal d'une structure multi-matériaux calculée basée sur les voxels est que les matériaux inertes et actifs soient répartis spatialement dans une grille de voxels 3D, afin d'obtenir le changement de forme désiré. La première étape consiste à sectionner la structure  $A$  en fonction de sa répartition numérique des matériaux après avoir identifié des blocs homogènes  $P_i$  (ensemble de voxels) dans cette représentation à base de voxels (cf. Figure 1).

### 2.2. Etape 2: Modélisation des relations de blocage

Cette étape consiste à adopter des modèles mathématiques tels que les graphes orientés et les matrices d'adjacence, afin de décrire les relations de blocage dans toutes les directions ( $\pm x, \pm y, \pm z$ ) entre les blocs identifiés  $P_i$  à l'étape précédente. Les graphes orientés sont d'abord établis, puis traduits en matrices d'adjacence correspondantes pour le calcul des DDL et la détermination des blocs emboîtés. Un exemple d'assemblage 2D est illustré à la Figure 2, pour interpréter les relations de blocage entre les pièces  $P_i$ . Soit un  $(GOB)_d = (P_i, R_i)$ , un graphe orienté de blocage où  $P_i$  sont des pièces

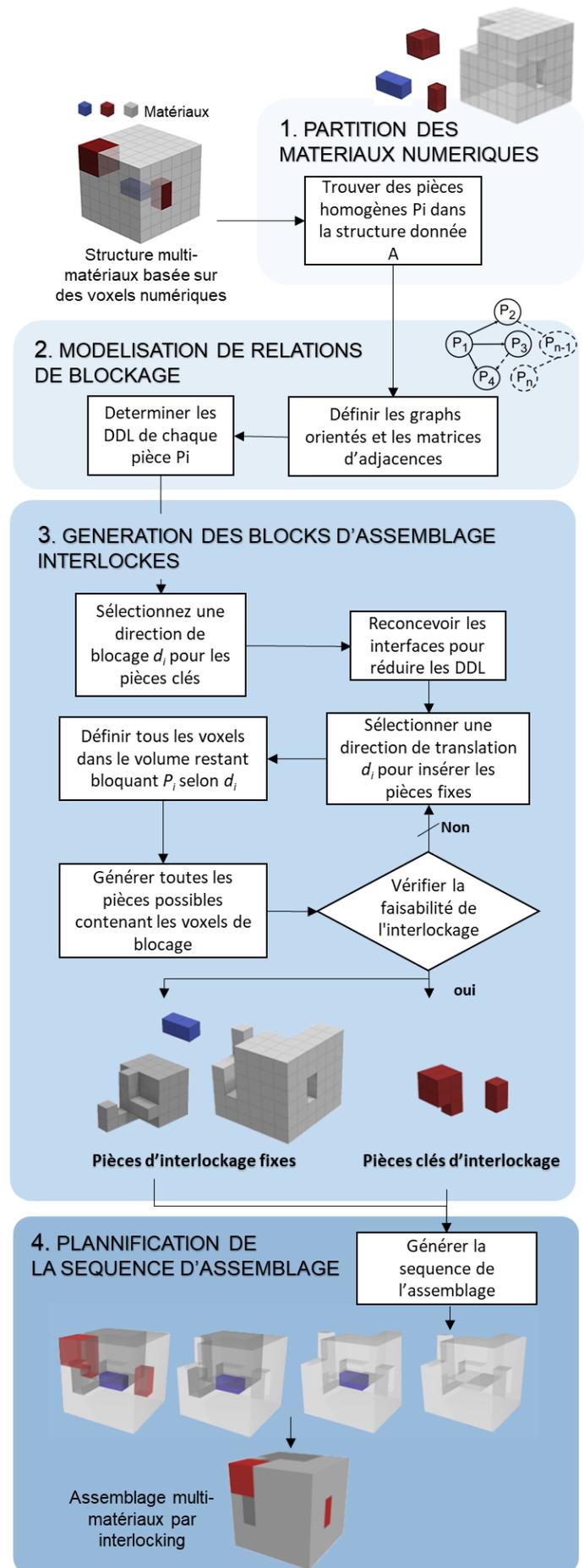


Figure 1 - Approche de conception computationnelle pour l'impression 4D multi-matériaux [1]

homogènes (blocs) de l'assemblage  $A$ , et  $R_i$  sont des paires ordonnées (flèches) de nœuds pour définir les relations de blocage entre  $P_i$  le long de la direction  $d (\pm x, \pm y, \pm z)$ . Par exemple, une paire ordonnée entre  $P_1$  et  $P_2$  indique que  $P_1$  est bloqué par  $P_2$  le long de  $d_i$ .

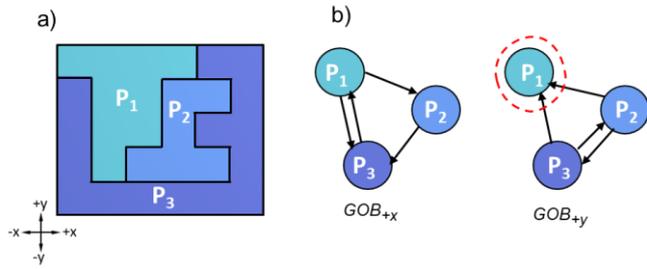


Figure 2 - Exemple d'un assemblage de trois pièces emboîtées. (a) agencement des pièces (b) GOB connexes le long des directions  $+x$  et  $+y$ . La pièce clé en direction de  $+y$  est mise en évidence dans le cercle rouge discontinu [1].

Un assemblage  $A$  est considéré comme emboîté lorsque chacune de ses pièces est complètement immobilisée une fois positionnée (insérée dans l'assemblage). La ou les pièces clés sont les seules pièces qui ont la liberté de se déplacer pour assurer la fixation mécanique de l'assemblage (à en assurer le montage et le démontage répétables), voir  $P_1$  à la Figure 2.

### 2.3. Etape 3 : Génération d'assemblage de blocks emboîtés

Dans cette section, le calcul de la génération d'assemblages de blocs emboîtés sera abordé. L'algorithme développé a pour but de découper une structure 3D/4D multi-matériaux en blocs homogènes (pièces) et de définir leur arrangement par emboîtement. Une fois les blocs assemblés, la forme 3D/4D désirée est obtenue. Le calcul se fait en deux temps. Tout d'abord, toutes les pièces avec (DDL>1) sont redéfinies pour réduire leur DDL à 1 degré et classées comme pièces clés. Ensuite, les pièces (ou les voxels) encastrés avec (DDL=0) sont libérées pour faciliter leur insertion dans l'assemblage, en permettant un découpage supplémentaire dans le volume restant. Ainsi, de nouvelles pièces emboîtables sont générées (pièces fixes). Les pièces restantes (DDL=1) sont automatiquement définies comme des pièces clés.

Puisque la distribution numérique multi-matériaux est imposée par la modélisation basée sur les voxels, la génération itérative de blocs emboîtés peut être considérablement complexe et longue. Ainsi, quelques actions et conditions sont mises en place, afin de garantir l'emboîtement des pièces générées, et sont les suivantes :

- Des modifications mineures dans la distribution numérique multi-matériaux sont autorisées lorsque cela est nécessaire pour surmonter les limitations de calcul sans affecter les propriétés physiques de la structure.
- Chaque pièce peut être insérée dans une et une seule direction de translation.

- Une fois que la ou les pièces clés sont insérées dans l'assemblage, ce dernier est entièrement sécurisé et maintenu.

Afin de mieux expliquer cette étape essentielle, la Figure 3 présente un exemple simple d'un assemblage 3D contenant quatre blocs homogènes. Il illustre une représentation basée sur les voxels ( $6 \times 6 \times 6$  voxels) avec une distribution aléatoire des matériaux numériques. Chacun des quatre blocs composant la structure initiale  $P_1, P_2, P_3$  et  $P_4$ , respectivement, représente un matériau ou une propriété spécifique. Tout d'abord, les pièces clés sont générées, puis la génération des autres pièces emboîtées suit.

#### 2.3.1. Génération des pièces clés

Comme illustré sur la Figure 3a,  $P_1$  a DDL>1 (pièce mobile), en d'autres termes,  $P_1$  est capable de se déplacer le long de plus d'une direction de translation ( $-x, -y, +z$ ) sur la Figure 3a. Dans ce cas, une légère modification de la distribution initiale du matériau est nécessaire pour assurer l'assemblage par emboîtement de  $P_1$ . Supposons que nous voulons bloquer  $P_1$  le long des directions  $-x$  et  $-y$ , et la garder mobile uniquement le long de  $+z$ . Dans ce but, nous sélectionnons tous les voxels voisins de  $P_1$  (cf. Figure 3b), puis nous choisissons aléatoirement un voxel candidat qui remplit la condition de blocage (cf. Figure 3c). Le candidat choisi sera ensuite ajouté à la pièce clé  $P_1$  (cf. Figure 3d). De cette manière, la pièce clé  $P_1$  restera mobile le long d'une seule direction de translation  $+z$ .  $P_3$  sur la Figure 3a a un seul DDL. Cette pièce sera automatiquement définie comme une deuxième pièce clé.

#### 2.3.2. Génération des pièces fixes

Comme l'illustre la Figure 3a,  $P_2$  est entièrement encastré dans  $P_4$ , il est donc impossible de l'insérer ou de la désassembler. Pour contourner ce dilemme, le développement de l'algorithme envisage des raisonnements successifs. Tout d'abord, une direction aléatoire est choisie pour insérer la pièce concernée (par exemple,  $+y$  sur la Figure 3e). Ensuite, une sélection de tous les voxels bloquants dans la direction choisie suit (voxels en vert sur la Figure 3e). Ensuite, l'algorithme génère toutes les pièces possibles contenant les voxels de blocage. Enfin, seules les pièces qui garantissent l'insertion vers une seule direction et les conditions de blocage, sont conservées comme options (cf. Figure 3f pour un exemple de génération d'emboîtement valide).

### 2.4. Etape 4 : Planification de la séquence d'assemblage

Cette étape est considérée comme cruciale. Elle a lieu pour déterminer l'ordre d'assemblage de chaque pièce emboîtée et générée afin de construire finalement la structure 3D/4D multi-matériaux désirée. Pour ce faire, l'algorithme va classer l'ordre de génération des pièces i-

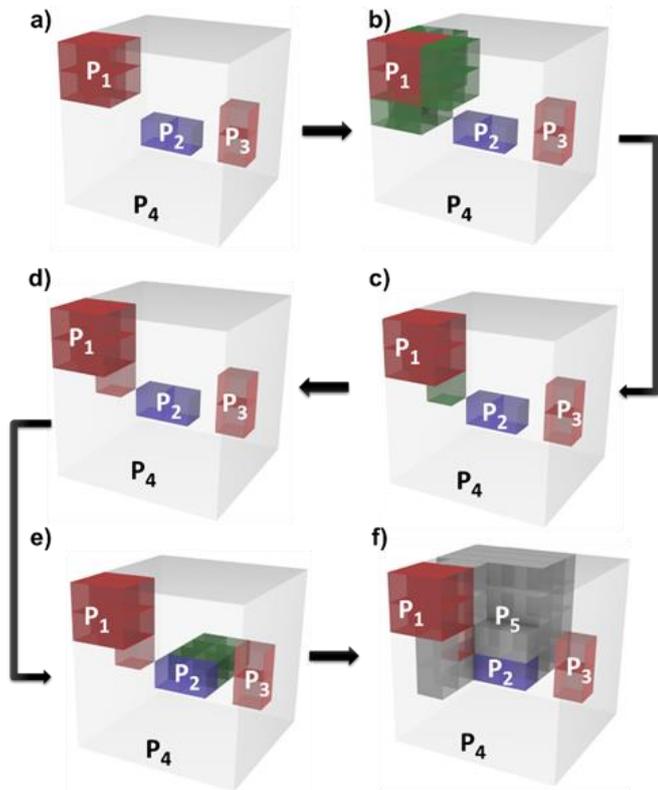


Figure 3 - Cube à base de distribution multi-matériaux numérique contenant  $6 \times 6 \times 6$  voxels, (a) structure d'entrée, chacune des couleurs des voxels correspond à un type de matériau/propriété, (b) à (d) génération de pièces clés, (e) et (f) génération de pièces fixes emboîtées [1].

mbriquées en utilisant les relations de blocage et les couches de raisonnement précédemment citées. La séquence d'assemblage est ensuite obtenue en inversant l'ordre de génération des pièces à imbriquer. C'est-à-dire que les dernières pièces générées seront les premières à être insérées dans l'assemblage et *vice versa*, ce qui est pertinent puisque les premières pièces générées sont des pièces clés (les dernières à être insérées pour fixer l'assemblage). La Figure 4 présente la séquence d'assemblage de l'exemple du cube.

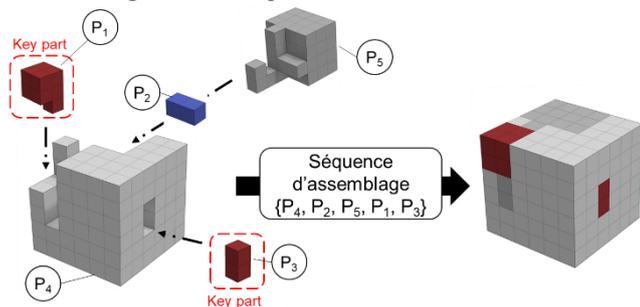


Figure 4 - Planification de la séquence d'assemblage d'un cube de  $6 \times 6 \times 6$  voxels, avec distribution numérique aléatoire multi-matériaux [1].

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie, un cas d'étude est mis en œuvre pour illustrer la pertinence et l'applicabilité de notre approche qui convertit une structure voxelisée 4D avec une distribution numérique multi-matériaux en un ensemble de blocs imbriqués homogènes, destinés à être imprimés

individuellement à l'aide de différents procédés de FA, puis assemblés selon la forme souhaitée. Le cas d'étude proposé est une barre mesurant  $18 \times 18 \times 126 \text{ mm}^3$ , composée de 1512 voxels ( $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$  par voxel). Un matériau souple (Agilus30) imprimé avec la machine Objet260 Connex3 (Stratasys Ltd., USA) et un hydrogel sensible à la température (préparé selon les travaux de [13] - celui-ci se contracte lorsqu'il est exposé à la chaleur - ont été utilisés pour construire une structure 4D capable de changer de forme.

#### 3.1. Résultats de génération d'un assemblage de blocs emboîtés

Nous illustrons ci-après une implémentation de l'approche de conception computationnelle proposée par le biais d'un plugin nouvellement développé appelé VoxSmart dans l'environnement Rhinoceros 3D / Grasshopper. Ce plugin comprend trois composants principaux :

- Le voxeliseur qui convertit une structure 3D en un modèle détaillé de distribution des matériaux basé sur les voxels.

- Le partitionneur de la distribution des matériaux qui décompose la représentation basée sur les voxels en sous-ensembles homogènes de voxels.

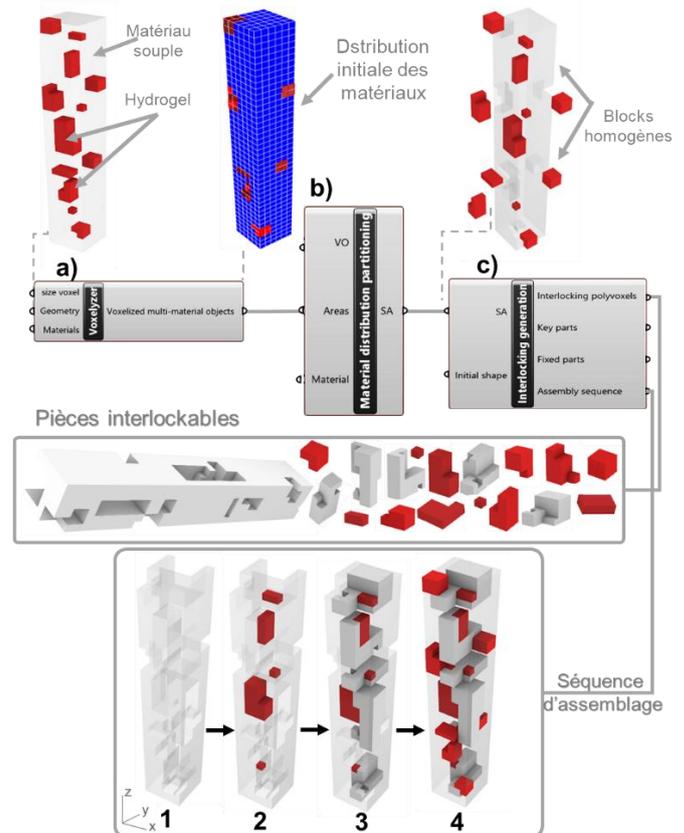


Figure 5 - Illustration d'un assemblage imbriqué d'une structure multi-matériaux de  $18 \times 18 \times 126 \text{ mm}^3$  avec étapes de génération et plugin VoxSmart dans l'environnement Rhinoceros 3D / Grasshopper pour le calcul de l'emboîtement : (a) Voxeliseur, (b) partition des matériaux, (c) génération de blocs imbriqués.

- Le générateur de assemblages par emboîtement qui génère l'ensemble des pièces imbriquées clés ainsi que les pièces fixes, mais aussi la planification de la séquence de l'assemblage. Il faut noter qu'il existe plus d'un assemblage possible, qui peut être généré. Un exemple de génération d'assemblages de blocs imbriqués est fourni à la Figure 5.

### 3.2. Simulation

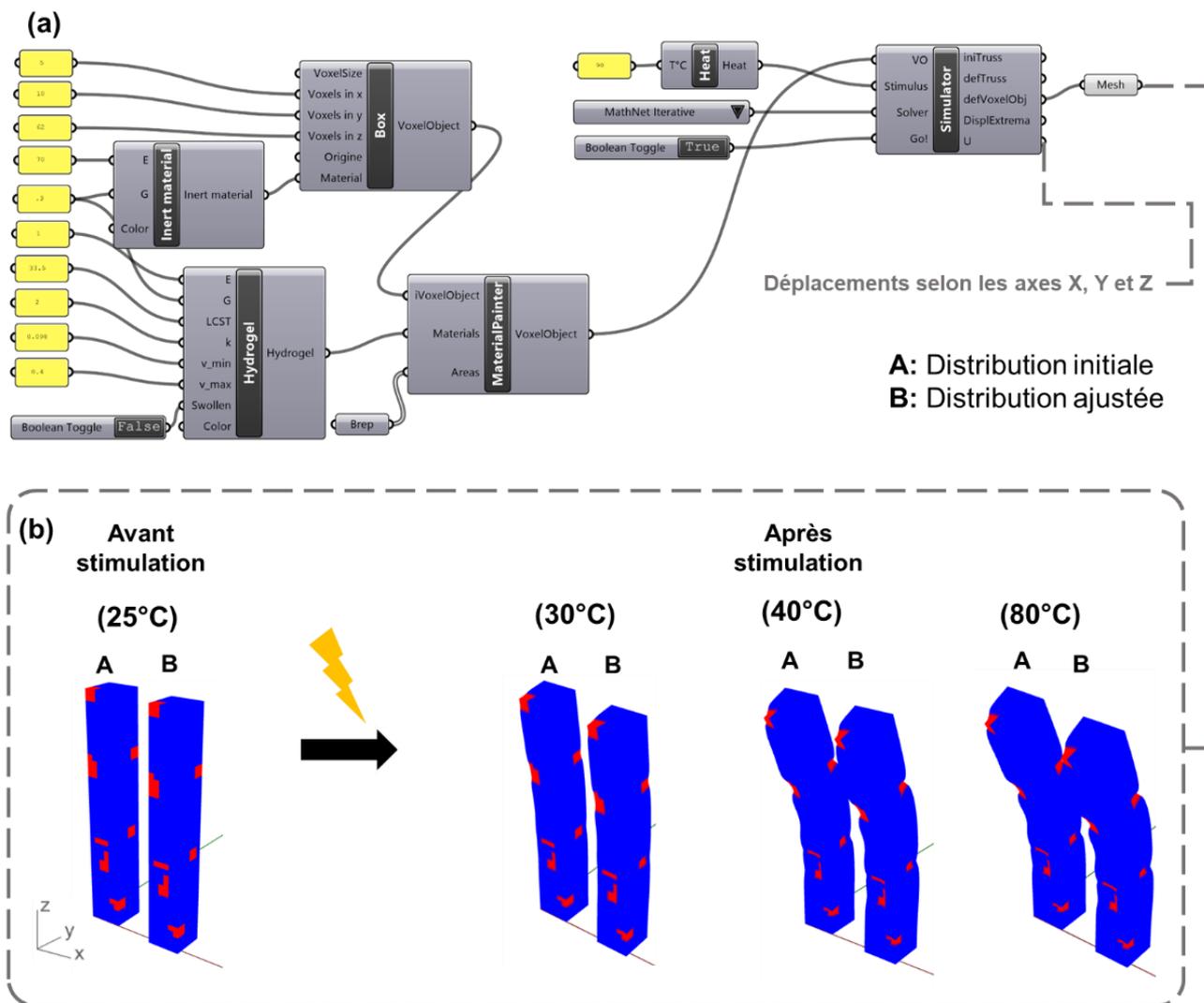
Comme évoqué à la Section 2.2, des complications de calcul peuvent survenir en raison de la distribution imposée des matériaux numériques. Par conséquent, des modifications mineures ont été autorisées lorsque cela était nécessaire afin d'assurer l'assemblage de toutes les pièces présentes dans la structure. Cependant, la moindre modification de la distribution des matériaux peut entraîner des conséquences considérables sur les propriétés physiques de la structure. Il est donc nécessaire de procéder à une phase de simulation pour déterminer si les propriétés physiques de la structure ont été négativement affectées ou non. On vise une différence

de déformation minimale entre la distribution initiale des matériaux et celle qui a été ajustée. La Figure 6 illustre les simulations de la distribution initiale et de la distribution ajustée, à différentes températures (25°C, 30°C, 40°C et 80°C). Quant au Tableau 1, il fournit des calculs de déplacement de voxels pour comparer quantitativement les deux distributions présentées.

**Tableau 1 – Différences max entre les positions des voxels dans la distribution originale et celle ajustée à 25°C, 30°C, 40°C, et 80°C.**

	25°C	30°C	40°C	80°C
Distance Max (10 <sup>-2</sup> mm ±0,01)	0	7.74	24.22	24.61

En considérant les résultats de la simulation dans la Figure 6 et les mesures de distances dans le Tableau 1, on peut remarquer que les différences en termes de changement de forme et de propriétés physiques sont très faibles, voire inexistantes, à différentes températures. De ce fait, les légères modifications appliquées dans la distribution numérique des matériaux pour générer l'assemblage par emboîtement n'ont pas altéré le compor-



**Figure 6 - Simulation de la déformation de la distribution originale (A) et de la distribution ajustée (B) : (a) plugins VoxSmart pour affectation des matériaux : matériau souple en bleu : Agilus30 ; matériau actif en rouge : hydrogel), et simulation SM, (b) distributions A et B avant stimulation thermique à 25°C et après stimulation à 30°C, 40°C et 80°C [1]**

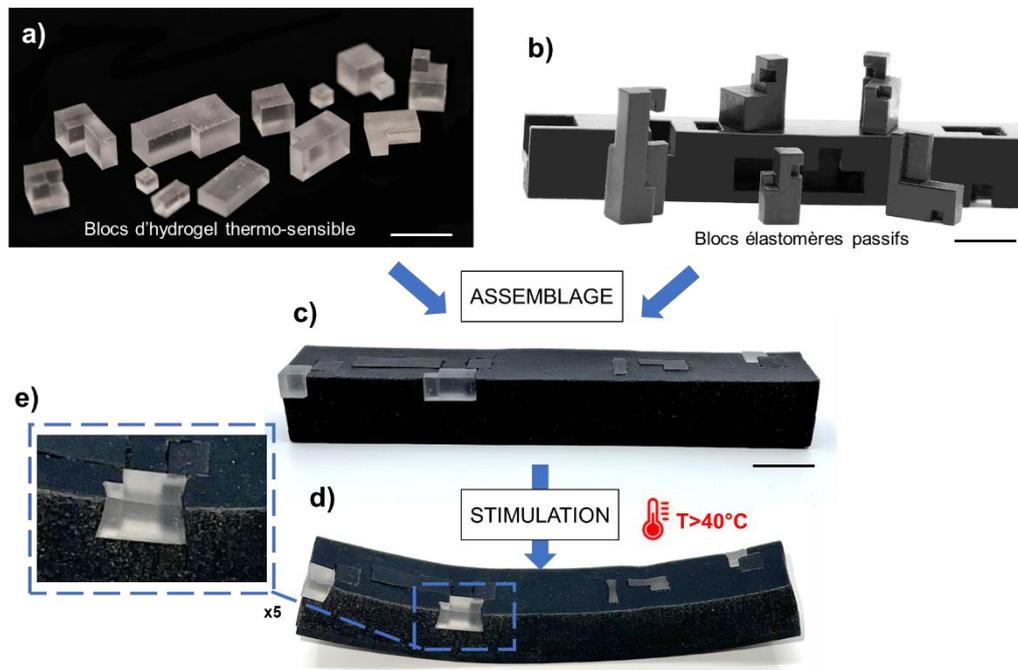


Figure 7 - Blocs imprimés : (a) hydrogel thermosensible, (b) blocs d'Agilus30, (c) assemblage des blocs imbriqués, (d) structure déformée après stimulation à l'eau chaude à 40°C, (e) agrandissement x5 [1].

-tement physique de la structure. Pour illustrer le changement de forme physique, les blocs d'assemblage (actifs et passifs) ont été imprimés puis assemblés manuellement pour construire une structure multi-matériaux avec une distribution numérique des matériaux. La Figure 7 montre le changement de forme du cas d'étude comme prévu dans la phase de simulation. Les images de déformation ont été capturées après une exposition de 3 minutes dans de l'eau chaude à 40°C. Cette figure montre également que les blocs sont restés imbriqués malgré la déformation due à la chaleur et à l'immersion dans l'eau. Cela ajoute plus de valeur à l'approche de conception computationnelle proposée.

#### 4. CONCLUSION

Dans cet article, nous proposons une approche de conception computationnelle dédiée aux assemblages 4D multi-matériaux. À partir d'une distribution numérique multi-matériaux qui répond à un comportement spécifique de changement de forme ou de propriété, l'algorithme développé convertit la représentation basée sur les voxels en un ensemble de blocs homogènes imbriqués permettant de construire la structure désirée une fois assemblée. L'étude démontre un moyen efficace de surmonter certaines limites de la FA, comme la construction d'assemblages complexes qui ne peuvent pas être imprimés par un procédé FA unique en une seule fois, en raison du volume d'impression ou de la compatibilité des matériaux. Dans ces conditions, on peut remarquer que notre cas d'étude était destiné à exécuter une configuration limitée de changement de forme. La relaxation de ces limitations devrait être abordée dans des travaux futurs, afin de généraliser l'approche actuelle.

#### REFERENCES

- [1] Benyahia, K., Seriket, H., Prod'hon, R., Gomes, S., André, J. C., Qi, H. J., & Demoly, F. (2022). A computational design approach for multi-material 4D printing based on interlocking blocks assembly. *AM*.
- [2] Demoly, F., André, J.C., Research strategy in 4D printing: Disruptive vs incremental?, *Journal of Integrated Design and Process Science* 24 (2020).
- [3] André, J.C., From additive manufacturing to 3D/4D printing. Breakthrough innovations: programmable material, 4D printing and Bio-printing, ISTE-Wiley, London, UK, 2017.
- [4] Dimassi, S., Demoly, F., Cruz, C., Qi, H.J., Kim, K.Y., André, J.C., Gomes, S., An ontology-based framework to formalize and represent 4D printing knowledge in design, *Computers in Industry* 126 (2021).
- [5] Demoly, F., Dunn, M.L., Wood, K.L., Qi, H.J., André, J.C., The status, barriers, challenges, and future in design for 4D printing, *Materials & Design* 212 (2021).
- [6] Hamel, C.M., Roach, D.J., Long, K.N., Demoly, F., Dunn, M.L., Qi, H.J., Machine-learning based design of active composite structures for 4D printing, *Smart Materials and Structures* 28 (2019).
- [7] Sossou, G., Demoly, F., Belkebir, H., Qi, H. J., Gomes, S., Montavon, G., Design for 4D printing: Modeling and computation of smart materials distributions, *Materials & Design* 181 (2019).
- [8] Doubrovski, E.L., Tsai, E.Y., Dikovskiy, D., Geraedts, J.M., Herr, H., Oxman, N., Voxel-based fabrication through material property mapping: A design method for bitmap printing, *Computer-Aided Design* 60 (2015) 3-13.
- [9] Song, P., Fu, C.W., Cohen-Or, D., Recursive interlocking puzzles, *ACM Transactions on Graphics* 31 (2012), 1-10.
- [10] Wang, Z., Song, P., Pauly, M., Desia: A general framework for designing interlocking assemblies, *ACM Transactions on Graphics* 37 (2018) 1-14
- [11] Tibbitts, S., 4D printing: multi-material shape change, *Architectural Design* 84 (2014), 116-121.
- [12] Jenett, B., Gershenfeld, N., Carney, M., Calisch, S., Spencer, W., Digital morphing wing: active wing shaping concept using composite lattice-based cellular structures, *Soft Robotics* 4 (2017) 33-48.
- [13] Lai, J., Ye, X., Liu, J., Wang, C., Li, J., Wang, X., Ma, M., Wang, M., 4D printing of highly printable and shape morphing hydrogels composed of alginate and methylcellulose, *Materials & Design* 205 (2021).

# Stratégie d'analyse multi-échelle pré-fabrication additive pour valider la fabrication

R. Kromer<sup>a</sup>, E. Gruhier<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

<sup>b</sup> Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

\* e-mail : robin.kromer@u-bordeaux.fr

## 1. INTRODUCTION

Malgré une longue évolution de la fabrication additive (FA), commençant par le premier brevet en 1971 [1], la technologie d'impression 3D n'a récemment connu une popularité explosive qu'en raison de la baisse radicale des coûts apportée par l'introduction de l'imprimante 3D (RepRap) [2]. Avec le processus d'extrusion de matériau thermoplastique, appelé fabrication par filament fondu (FFF), ces technologies prennent de l'importance dans beaucoup de domaines. La FFF domine actuellement le marché des imprimantes 3D utilisées [3]. Rendre la FA accessible au grand public a permis l'émergence d'un paradigme de fabrication distribuée [4], où l'impression 3D peut être utilisée pour fabriquer des produits adaptés et optimisés pour le consommateur et par le consommateur directement à moindre coût (dans de nombreux cas, plus d'un ordre de grandeur moins cher) que l'achat de produits propriétaires fabriqués en série [5]. Les ventes des objets imprimés augmentent [6] via les outils de numérisation qui évoluent fortement en parallèle de la FA, même pour des produits hauts de gamme sophistiqués [7]. Ils offrent un bon retour sur investissement [8]. De plus, il existe des indications que la fabrication FA réduit l'impact sur l'environnement [9]. Cependant, tant les aspects économiques que l'impact environnemental de la FA sont fortement impactés par le taux de réussite. Les premières études sur les RepRaps estimaient un taux d'échec de 20 % et des valeurs plus récentes d'environ 10 % [10], ce qui est dans la plage (120 %) des sondages récents de la communauté Reddit [11]. Bien que le coût d'impression avec une imprimante 3D basée sur la FFF soit facile à calculer par rapport aux autres techniques de FA, les erreurs d'impression sont suffisamment importantes pour impacter les mérites économiques et environnementaux de l'approche. À cette fin, plusieurs études et techniques ont été tentées pour réduire les taux d'échec. Nuchitprasitthai et al. [12] ont réussi à détecter les échecs "buse obstruée" et "impression incomplète" pour six objets différents en cinq couleurs. Les objets imprimés ont été testés dans des

expériences à une et à double caméra pour déterminer les déviations critiques de 5 % de forme et de taille à chaque 50<sup>ème</sup> couche. Les auteurs ont utilisé trois paires de caméras à 120 degrés d'écart pour reconstruire les points de surface 3D des objets imprimés à chaque 30<sup>ème</sup> couche pour détecter des déviations de taille critiques de 10%. Delli et Chang [14] ont proposé une approche de classification d'erreur d'impression 3D binaire (échouée/non échouée) basée sur une technique d'apprentissage supervisé, où le contrôle de qualité est effectué à des étapes critiques pendant le processus d'impression. Fastowicz et Okarma [15] ont développé une méthode d'évaluation de la qualité basée sur l'analyse de texture utilisant la matrice de co-occurrence de niveau de gris et les caractéristiques Haralick. Enfin, Rao et al. [16] ont développé un cadre de capteurs hétérogènes pour l'analyse en temps réel de la rugosité de surface basée sur. En résumé, la fabrication additive a connu des avancées significatives ces dernières années, en particulier avec l'introduction de l'auto-replication rapide et l'utilisation répandue de la technologie de FFF. Cela a conduit à un paradigme de fabrication distribuée, où les consommateurs peuvent produire des produits opensource à moindre coût que l'achat de produits fabriqués en série. Cependant, le taux de réussite des produits imprimés est un facteur clé pour déterminer l'impact économique et environnemental de la fabrication distribuée. Plusieurs études et techniques ont été mises en place pour réduire les taux d'échec, comme la détection des échecs spécifiques, les systèmes de commande bouclée, la classification des erreurs basée sur l'apprentissage automatique et l'analyse en temps réel de la surface. L'objectif de ce papier est de présenter un outil permettant de générer des graphiques avec des indicateurs de qualité du procédé vis-à-vis d'une pièce à imprimer.

En travaillant avec des formes 3D, ou encore le domaine de la topologie, il existe un certain nombre de techniques pour l'appariement de formes (primitives) et l'extraction de caractéristiques (invariants). Par exemple, l'extraction de caractéristiques pour un design dans les applications

CAD/CAM peuvent être l'analyse des opérations de génération de volume ou encore l'analyse de nombre d'Euler Poincaré permettant de définir le « genre » de l'objet [17]. Cependant, ces techniques sont généralement limitées à leurs applications spécifiques et inadaptées pour une recherche générale de formes 3D. Dans la communauté scientifique actuel, la démarche est de construire une base de données de formes 3D, de définir un outil de recherche de formes primaires associés et donc de pouvoir ensuite associer de la connaissance, par exemple dans notre cas pour la FA. La courbure est un candidat possible pour cet outil de recherche, et les méthodes utilisant la distribution de courbure ont fourni de bons résultats pour des utilisations telles que l'estimation de la pose de formes 3D [18]. Cependant, étant donné que la courbure est associée aux dérivées du second ordre, ces techniques sont inadaptées en tant qu'outil de recherche générale car elles sont sensibles au bruit et aux petites ondulations sur la surface de l'objet. D'autres études ont utilisé un histogramme global comme outil de recherche pour une base de données de formes 3D [19]. Ce type d'outil de recherche est stable en termes de calcul et convient pour représenter les caractéristiques grossières des formes, mais ne peut cependant pas estimer les caractéristiques locales. Afin de gérer simultanément les propriétés globales et locales, l'outil de recherche sélectionnée doit inclure une représentation concise de la forme, doit capturer les caractéristiques de la forme de manière efficace et doit être calculée automatiquement et robustement pour une base de données générale de formes 3D associée à la FA. Afin de satisfaire ces conditions, nous proposons d'utiliser une structure squelettique d'une forme 3D. Il y a eu de nombreuses études sur l'extraction d'un squelette à partir d'une forme 3D pour des applications telles que la déformation de formes, la modélisation et la planification de trajets. Une structure squelettique bien connue est le modèle d'axe médian [20]. Cependant, ce modèle est inapproprié car le calcul de l'axe médian 3D a un coût de calcul élevé et est sensible au bruit et aux petites ondulations. Après avoir examiné différentes options, nous avons choisi une structure squelettique appelée graphe de Reeb. Le graphe de Reeb, défini par Reeb lui-même [21], est un squelette déterminé à l'aide d'une fonction scalaire continue définie sur un objet. Tout d'abord, un graphe de Reeb consiste toujours en une structure de graphe à une dimension et n'a pas de composants de dimension supérieure tels que la surface dégénérée qui peut survenir dans un axe médian. Deuxièmement, en définissant la fonction continue de manière appropriée, il est possible de construire un graphe de Reeb qui est invariant à la translation et à la rotation, robuste contre les changements de connectivité causés par la simplification, la subdivision et le « remesh », et résistant contre le bruit et certains changements dus à la déformation [22]. Nous proposons ainsi d'identifier des « features » de fabrication additive vis-à-vis des graphes de Reeb en analysant les branches et ainsi d'y associer des formes de référence. Elles peuvent être imprimées et constituer une analyse comme les travaux autour des pièces benchmark en FA [23]. Cela nous permet

de détecter ainsi les erreurs de fabrication telles que les déviations de forme et de taille, les échecs de liaison de filament, et les problèmes de rugosité de surface. Au fur et à mesure, il sera ainsi possible de générer une base de données pour différents types de branche et donc de faire un apprentissage non-supervisé de l'expérience. Nous pouvons donc détecter les problèmes de manière proactive et corriger les erreurs avant qu'elles ne causent des défauts dans les produits finis imprimés. En somme, ces travaux peuvent permettre de reconnaître les « features » de fabrication additive, d'améliorer la qualité, l'efficacité et la fiabilité des processus de fabrication additive en y associant du savoir-faire et l'expérience, tout en réduisant les coûts et les impacts environnementaux. Cela permet de rendre la fabrication additive plus accessible et plus rentable pour les utilisateurs finaux via une méthode d'explicitation des connaissances.

Dans un premier temps, l'outil d'analyse d'impression G-Code est présenté, afin d'obtenir des graphiques ou images spécifiques à l'échelle de la couche, puis la méthodologie employée sera explicitée sur un objet avec une analyse des résultats obtenus. Finalement, une discussion est proposée sur l'importance d'avoir au bureau d'étude des indicateurs de fabricabilité dans une approche de conception via des connaissances explicites en fabrication additive.

## 2. OUTILS

Pour développer un outil en python qui permette de générer des graphiques avec des indicateurs de qualité du procédé, nous devons d'abord intégrer un simulateur de processus qui présente une relation claire entre les paramètres d'impression et la qualité de la pièce (le papier se focalise sur l'impression FFF). Ce simulateur doit visualiser l'effet combiné de la modification de la vitesse de la tête d'impression, de la température de l'extrudeur et de l'épaisseur de couche. Ces paramètres sont liés à la qualité de la pièce et aux échecs potentiels de l'impression car ils affectent la taille et la forme des cordons imprimés (le matériau extrudé après sa sortie de la buse).

Ensuite, nous devons intégrer une simulation thermique en temps réel pour permettre aux utilisateurs d'explorer les compromis entre les paramètres d'impression et de trouver les réglages de la machine qui leur permettent de mieux atteindre leurs objectifs. Cette simulation doit être visualisée de manière claire et facilement compréhensible pour les utilisateurs, par exemple en affichant la buse d'impression et en indiquant les variations de température avec la longueur des cordons et la vitesse de la tête d'impression. Enfin, nous devons intégrer des fonctionnalités pour définir des règles qui explicite ainsi la connaissance.

Pour mettre en place cet outil, nous devons utiliser des bibliothèques Python telles que Matplotlib pour générer

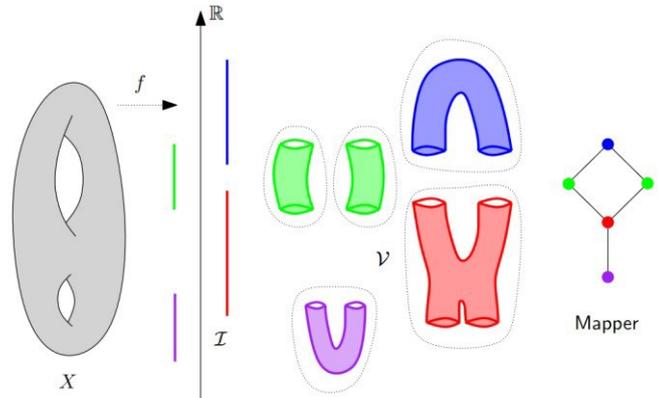
des graphiques et des indicateurs de qualité du procédé, et Numpy pour effectuer des calculs mathématiques nécessaires pour la simulation thermique. Nous avons également utilisé des bibliothèques telles que PySerial pour communiquer avec le contrôleur d'impression et obtenir des données en temps réel. L'idée était de pouvoir évaluer rapidement une distribution de chaleur en fonction des lignes de gcode produit par un outil de slicing grâce à des outils de machine learning tel que les bibliothèques de « Gaussian Process » de la librairie scikitlearn. En somme, cet outil permet aux utilisateurs de comprendre les relations entre les paramètres d'impression et la qualité de la pièce, de réduire les échecs de l'impression en ajustant les paramètres (voir même reboucler avec une modification en temps réel, et de transférer les paramètres optimisés) dans un logiciel de préparation d'impression pour établir une boucle de rétroaction avant fabrication par l'utilisateur. Cela permettra une utilisation plus efficace et rentable de la fabrication additive pour les utilisateurs finaux.

Une stratégie pour utiliser des données en temps réel d'une imprimante 3D pour prédire les déviations de fabrication et thermiques consiste à utiliser un processus gaussien (GP). Un GP est un modèle statistique qui peut être utilisé pour prédire des valeurs continues en utilisant des données d'entrée. Dans le cas de l'impression 3D, les données d'entrée sont la vitesse de la tête d'impression, la température de l'extrudeur et l'épaisseur de couche. Les données de sortie sont les déviations de fabrication et les gradients thermiques en cours d'impression. Le papier ne présente pas la méthode et les résultats permettant de générer les métamodèles prédictifs. Ils se focalisent sur l'utilisation.

Pour mettre en place ce modèle, nous avons d'abord collecter des données d'entraînement en imprimant des objets avec différents paramètres d'impression et en mesurant les déviations correspondantes. Les déviations sont des mesures de défauts (écoulement inhomogène, effondrement) et mesure thermique avec caméra thermique (gradient thermique à l'échelle de la couche). Nous avons ensuite utilisé ces données pour entraîner un GP. Une fois le modèle entraîné, nous utilisons des données dites de consigne de l'impression pour prédire les déviations de fabrication et thermiques. Un métamodèle est donc généré pour le remplissage, le contour et le top/bottom par couche. L'optimisation des paramètres n'est pas implémentée aujourd'hui.

Dans un deuxième temps, en utilisant les graphes de Reeb, il est possible de trouver des « features » en y associant les défauts. Ces branches peuvent être défini comme l'approche spatiotemporelle de Douin et al. [24]. En utilisant des méthodes d'analyse topologique de donnée, cela permet de générer une segmentation de maillage en associant chaque point du contour à un segment du graphe de Reeb. Si on reprend l'approche basée sur la méréotopologie et sur l'analyse du graphe de Reeb, il est donc possible de se retrouver dans le cas

de « features » comme l'illustre la Figure ci-dessous. C'est-à-dire que les points définissant la jonction ou la séparation, peuvent être décrites. Cette approche permet ainsi d'identifier une zone type de l'objet et en corrélant l'analyse des couches (défauts de formes et déviation thermiques), il est possible d'explicitier des règles.



Graphe de REEB

Figure 1 : Graphique représentant la représentation sous forme de graphique de REEB et le découpage possible

La stratégie a été de développer des métamodèles prédictifs pour prédire la qualité et la fabricabilité des « features » identifiés avec les graphes de Reeb sur un ensemble de pièce (base de données 10KThings). En reprenant les features proposés [24] et des analyses tels que la rugosité, les dimensions et les défauts, on a donc entraîné un modèle pour prédire des caractéristiques pour des paramètres d'impression spécifiques.

### 3. RESULTATS

Pour présenter nos résultats sur l'analyse de couche, nous utilisons le modèle 3D "standford bunny" comme exemple d'application. Ce modèle est utilisé fréquemment dans les études de cas pour les techniques d'analyse de forme 3D. Il nous permet de visualiser les résultats de notre méthode de segmentation et de prédiction de manière claire et intuitive. Nous nous focalisons sur les oreilles dans ce papier.

#### 3.1. Analyse à l'échelle d'une couche

Dans le cas de l'objet de test "bunny", il a été démontré que des défauts se produisent principalement sur les

oreilles de l'objet, particulièrement dans les zones de transition (tête-oreille). La Figure 2 illustre la couche avec présentation de la séquence de remplissage et de la prédiction des zones dites de défauts. Il y a une variation non négligeable du débit dû à la rétractation au démarrage, passage de l'oreille à une autre et sur le contour. On observe ainsi un remplissage plutôt uniforme par contre avec des instabilités principalement sur les différentes phase de construction. Le début des zones 1 et 2 et 3 pour le remplissage s'assimile à deux types de défauts. Le premier est la rétraction entre deux couches (cas 1) et au problème d'écoulement à cause d'une buse chaude en (2) et (3). On ajoute aussi un défaut sur l'ensemble des contours car on construit dans le vide et un effondrement est observé.

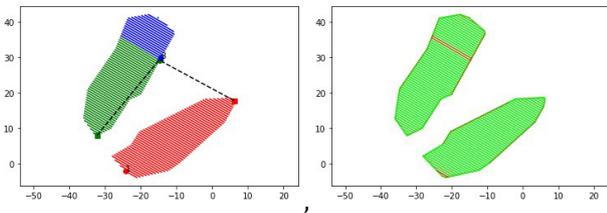


Figure 2 : Trajectoires gcode diviser en zone pour le remplissage et analyse des zones de déviation prédits en rouge

Deplus, en utilisant une analyse des gradients de taille de cordon, il est possible de détecter les zones de remplissage qui vont engendrés des zones plus chaude. Cela peut être fait en comparant les gradients dans ces zones avec un seuil prédéfini. Si les gradients dépassent ce seuil, cela indique qu'il y a un excès de chaleur. Ces excès de chaleur jouent sur la qualité des propriétés locales. Ces informations permettent de mettre en évidence un problème éventuel local. Cette méthode est intéressante car elle permet de mettre en évidence les zones de remplissage qui ont des déformations potentielles excessives, même si elles ne sont pas visibles à l'œil nu. Elles vont se cumuler lors de la fabrication. La figure 3 est un exemple de l'analyse du gradient sur la zone 2 du remplissage. L'expérience défini un seuil à -5 pour ce matériau et cette paramétrie.

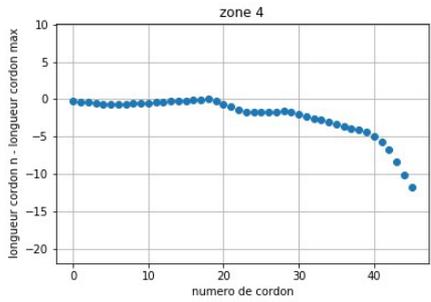
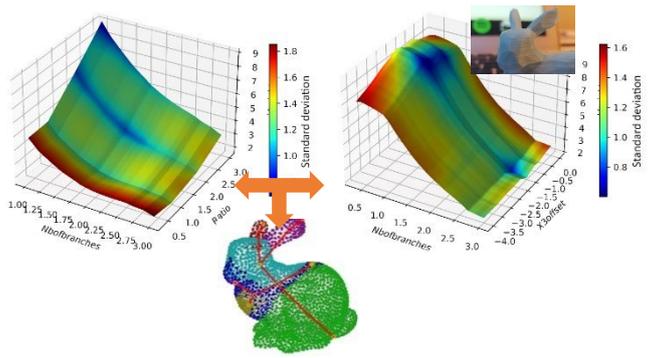


Figure 3 : Analyse du gradient des longueurs des cordons

### 3.2. Formalisation des connaissances à l'échelle des features

En utilisant un gaussian process, nous avons donc utiliser les données machines (G-code) pour prédire des éléments sur la qualité et la fabricabilité. L'idée est d'associer ces connaissances tacites à des features

identifiées avec les graphes de Reeb. En utilisant le modèle 3D bunny, nous pouvons ainsi représenter les deux branches des oreilles. Elles peuvent être ainsi décrites comme un feature de type « extrusion à section variable » qui précèdent une « séparation ». Les métamodèles sont ainsi associés sur ce type de features. Il est ainsi possible d'interpréter dans le cas de nos oreilles si on est dans cas favorables sur la qualité de surface noté de 1 à 10. On peut donc évaluer avant fabrication la qualité. Dans le cas des oreilles, on a deux branches avec une variation assez fortes mais surtout avec un angle important. On réduit donc fortement la note sur la qualité de surface. Plusieurs critères peuvent être présentés..



En utilisant une approche globale avec les graphes de Reeb, nous identifions les oreilles du Bunny comme un feature correspondant à un porte à faux. L'utilisateur peut donc associer une connaissance explicite sur les notions de porte à faux et de qualité de surface. L'idée est ensuite de générer un abaque pour évaluer les paramètres de fabrication, il peut donc définir une pièce benchmark avec une topologie de feature et définir explicitement les erreurs sur la géométrie en termes de déviation (exemple de mesure Figure 4) .

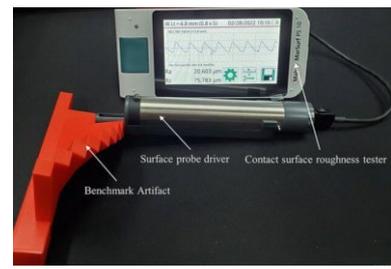


Figure 4 : Exemple de mesure de rugosité pour porte à faux

## 4. DISCUSSION

Un outil d'analyse locale basé sur une analyse de g-code a été développé et consiste à présenter sur des zones spécifiques de la pièce à imprimer, comme des zones de défauts (transition ou contours). Cette méthode permet de détecter des défauts spécifiques et d'apporter des informations avant l'impression. Par exemple, en utilisant des outils tels que l'analyse des

gradients, il est possible de détecter des problèmes potentiels dans les zones de remplissage. La visualisation de ces informations est primordiale mais doit être assez explicite. Des personnes formées et compétentes ayant notions des problématiques présentés sont nécessaires. Cet outil ne convient pas dans le cas de débutant. Cet outil a été mis en place dans le cadre d'une formation et permet ainsi d'explicitier des notions (parcours d'approfondissement en fabrication additive en IUT GMP).

D'autre part, une approche globale a été présentée consistant à examiner la topologie de la pièce et visualiser cette dernière sous forme de graphes de Reeb. Cette méthode a permis de catégoriser les différentes parties de la pièce en fonction de leur topologie et de leur géométrie vis une représentation en squelette. Il est intéressant de voir que la représentation squelettique est fortement enseignée et permet ainsi de mettre à un même niveau la représentation d'un objet (même complexe). Cette représentation permet d'associer les erreurs de fabrication prédites à des zones de l'architecture. Cependant, cette approche peut ne pas prendre en compte les détails locaux qui peuvent causer des défauts spécifiques et les interactions. L'ensemble des features et leurs interactions doivent être aussi prédis. Ces notions sont en cours de développement au travers d'une nouvelle théorie de méréotopologie comportementale par les auteurs.

Il est apprécié par des experts et des apprenants de combiner les deux approches afin de bénéficier des avantages de chacune d'entre elles. Il est également important de se poser des questions sur les paramètres d'impression standard utilisés et de les évaluer afin de maximiser la qualité de la pièce imprimée. En utilisant ainsi une combinaison d'analyse locale et globale, ainsi qu'en se posant des questions sur les paramètres d'impression, il est possible d'améliorer la conception de la pièce avant l'impression mais surtout de se poser des questions pour améliorer sont process en vue d'une industrialisation. Cet outil permet ainsi d'expliquer ces choix et donc d'avoir rendu la connaissance explicite.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Il est noté qu'il existe une forte relation produit procédé matériaux en fabrication additive et qu'il existe un réel besoin de transmettre des connaissances à chaque étape du développement du produit et surtout dans les phases avant production. Suite à des travaux en cours, un outil permet de détecter les éventuels défauts de fabrication et de les corriger avant la réalisation physique. Les approches d'analyse locale et globale ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. L'analyse locale permet une détection précise des défauts mais est limitée à une zone spécifique du modèle. L'analyse globale, quant à elle, permet d'y associer des informations sur des features. Il est donc important de combiner ces deux approches pour obtenir des résultats optimaux, par exemple en concevant des

pièces benchmark spécifiques aux besoins. Il est ainsi possible d'explicitier ces connaissances et de continuer à explorer de nouvelles méthodes/manières pour améliorer la fabrication afin de garantir la qualité et la faisabilité des modèles imprimés en 3D.

## RÉFÉRENCES

- [1] P. Ciraud. Pierre Alfred Leon Ciraud, A method and apparatus for manufacturing objects made of any arbitrary material meltable. German patent application DE2263777A1. December 28, 1971, <https://patents.google.com/patent/DE2263777A1/en>.
- [2] E. Sells, S. Bailard, Z. Smith, A. Bowyer, V. Olliver, RepRap: the replicating rapid prototype – maximizing customizability by breeding the means of production, in F.T. Piller, M.M. Tseng (Eds.), Handbook of Research in Mass Customization and Personalization, World Scientific, Singapore, 2009, Vol. 1, pp. 568-580.
- [3] T. Wohlers, I. Campbell et al., Wohlers Report: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Wohlers Associates, Inc., 2018.
- [4] N. Gershenfeld, Fab: the coming revolution on your desktop – from personal computers to personal fabrication, Basic Books, New York, 2005.
- [5] B. Wittbrodt, J. Laureto, B. Tymrak and J.M. Pearce, 2015. Distributed manufacturing with 3-D printing: a case study of recreational vehicle solar photovoltaic mounting systems, Journal of Frugal Innovation, 1(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40669-014-0001-z>.
- [6] J.M. Pearce, 2015. Quantifying the Value of Open Source Hardware Development, Modern Economy, 6, 1-11. <http://dx.doi.org/10.4236/me.2015.61001>.
- [7] J.M. Pearce, 2012. Building research equipment with free, open-source hardware, Science, 337(6100), 1303-1304. <https://doi.org/10.1126/science.1228183>.
- [8] J.M. Pearce, 2016. Return on investment for open source scientific hardware development, Science and public policy, 43(2), 192–195. <https://doi.org/10.1093/scipol/scv034>.
- [9] M. Kreiger and J.M. Pearce, 2013. Environmental impacts of distributed manufacturing from 3-D printing of polymer components and products, MRS Online Proceedings Library Archive, 1492, 85-90. <https://doi.org/10.1557/opl.2013.319>.
- [10] J. King, The True Cost of Running a Desktop 3D Printer. <https://3dprinting.com/cost-running-desktop-3d-printer>, 2017 (accessed 01 March 2020).
- [11] Reddit 3D Printing Community [https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/57ycv0/poll\\_whats\\_your\\_average\\_failure\\_rate](https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/57ycv0/poll_whats_your_average_failure_rate), (accessed 01 March 2020).
- [12] S. Nuchitprasitchai, M.C. Roggemann & J.M. Pearce, 2017. Factors effecting real-time optical monitoring of fused filament 3D printing, Progress in Additive Manufacturing Journal, 2017, 2(3), 133-149. <https://doi.org/10.1007/s40964017-0027-x>.
- [13] K. Garanger, T. Khamvilai, E. Feron, E. 3D Printing of a Leaf Spring: A Demonstration of Closed-Loop Control in Additive Manufacturing, IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2018, pp. 465-470. <https://doi.org/10.1109/CCTA.2018.8511509>.
- [14] U. Delli, S. Chang, Automated processes monitoring in 3D printing using supervised machine learning, Procedia Manufacturing, 26 (2018), 865-870. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.111>.
- [15] J. Fastowicz, K. Okarma. Texture based quality assessment of 3D prints for different lighting conditions. In Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Graphics, ICCVG 2016. [https://doi.org/10.1007/978-3-31946418-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-31946418-3_2).
- [16] P. J. Besl and N. D. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Trans. PAMI, Vol.14, pp.239-256, 1992
- [17] C. Dorai and A.K. Jain. COSMOS-A Representation Scheme for 3D Free-Form Objects. IEEE Trans. PAMI, Vol.19, pp.1115-1130, 1997
- [18] P. J. Besl. Triangles as a Primary Representation Object Recognition in Computer Vision, LNCS 994, pp.191-206. Springer-Verlag, 1995
- [19] H. Chuang, C.-H. Tsai and M.-C. Ko. Skeletonization of Three-Dimensional Object Using Generalized Potential Field. IEEE Trans. PAMI, Vol.22, pp.1241-1251, 2000

- [20] H. Blum. A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape. Proc. Symp. Models for the Perception of Speech and Visual Form, pp.362-380, MIT Press, 1967
- [21] G. Reeb. Sur les points singuliers d'une forme de Pfaff complètement intégrable ou d'une fonction numérique [On the Singular Points of a Completely Integrable Pfaff Form or of a Numerical Function]. Comptes Rendus Acad. Sciences Paris, Vol.222, pp.847-849, 1946.
- [22] Brandolini, Laura & Piastra, Marco. (2012). Computing the Reeb Graph for Triangle Meshes with Active Contours. ICPRAM 2012 - Proceedings of the 1st International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods. 2. 80-89..
- [23] Fahad, Muhammad and Neil Hopkinson. "A new benchmarking part for evaluating the accuracy and repeatability of Additive Manufacturing ( AM ) processes.", Materials Science, 2012.
- [23] Douin, Chloe et al. (2022), "A method for design for additive manufacturing rules formulation through Spatio-temporal process discretization", *Procedia CIRP*, 32nd CIRP Design Conference.

# Modèle analytique amélioré pour les ressorts de compression cylindriques meulés en prenant en compte le défaut de parallélisme de leurs surfaces d'appui

G.Cadet <sup>a,\*</sup>, M.Paredes <sup>b</sup>, H.Orcière <sup>a</sup>

<sup>a</sup> STRAIN, CGR International, 2 Henri Poincaré ZI les Beaudottes 93270 Sevran, France

<sup>b</sup> ICA, Université de Toulouse, UPS, INSA, ISAE-SUPAERO, MINES-ALBI, CNRS, 3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France

\* e-mail : cadet@insa-toulouse.fr

## 1. INTRODUCTION

La loi de Hooke est la première théorie à décrire la propriété d'un ressort hélicoïdal, qui définit sa raideur comme un ratio de la force sur son déplacement. Ce ratio étant constant, le comportement du ressort est linéaire. L'équation (1), permettant de décrire le comportement mécanique des ressorts de compression, a été énoncé pour la première fois par A.M. Wahl en 1963 [1]. Elle est simple à mettre en œuvre, c'est pourquoi elle est reprise par l'ensemble des standards et normes. En revanche, elle admet beaucoup d'hypothèses simplificatrices telles que, entre autres : la force de compression est parfaitement centrée sur l'axe d'enroulement du ressort, le fil est sollicité en torsion pure, le fil se comporte comme une barre droite, les spires d'extrémité n'ont aucun effet sur le comportement du ressort, les extrémités sont parallèles, l'effet de courbure sur le ressort n'est pas pris en compte, ou encore la considération d'un cas avec uniquement des faibles déformations.

$$K = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n_a \cdot D^3} \quad (1)$$

Avec  $G$  le module de torsion,  $n_a$  le nombre de spires actives,  $d$  le diamètre de fil et  $D$  le diamètre moyen des spires.

L'*Institute of Spring Technology* rappelle que les premiers et derniers 20% de la courbe effort-longueur ne suivent pas la raideur globale du ressort et recommande d'éviter ces régions de fonctionnement. En effet, la zone finale de compression est connue pour ses fortes non linéarités dues aux différents contacts entre spires. En

revanche, les non linéarités en début de compression sont beaucoup moins justifiées dans la littérature. Les ressorts les plus touchés par cette anomalie sont les ressorts de compression cylindriques à extrémités rapprochées non meulées. La plupart du temps, le début du comportement du ressort est tronqué afin de supprimer cette zone difficile à prédire (justifié par l'application d'une précharge) ou souvent ignoré [2-6].

En 2016, M. Paredes [7] observe ces non-linéarités, non seulement sur des ressorts cylindriques à extrémités rapprochées non meulées, mais aussi sur des ressorts meulés. Il décide alors de créer un modèle empirique mathématique corrigeant les valeurs de la longueur libre et du nombre de spires actives afin de modifier la courbe de raideur de ces ressorts. Son objectif est de réussir à corréliser sa nouvelle loi linéaire avec les données expérimentales. Ses corrections, malgré leur absence de sens physique, ont tout de même le mérite de mettre en évidence ce comportement non prédit par la formule actuelle de la raideur et cela, que le ressort soit meulé ou non. Il souligne que ce phénomène se produit de manière plus prononcée chez les ressorts ayant des index (ratio  $D/d$ ) et nombre de spires actives faibles.

En 2021, G. Cadet et al. [8] mettent en évidence l'effet de la géométrie des spires d'extrémités sur le comportement non-linéaire de la relation effort-longueur des ressorts de compression cylindriques à extrémités rapprochées non meulées. Ils créent de manière rigoureuse un développement analytique qui permet de décrire avec précision le comportement mécanique de ces ressorts. Ces travaux prouvent l'impact de la géométrie, de la raideur et du comportement spatial des spires d'extrémités sur le ressort de manière globale. Il est alors nécessaire de comprendre ce qu'il se passe durant la

compression du ressort. Au départ, un ressort de compression cylindrique à pas constant, non meulé et guidé axialement, ne possède qu'un unique point de contact entre sa spire d'extrémité et sa surface d'appui. Le chargement axial est, par conséquent, décentré de l'axe principal du ressort et localisé sur un bord. Durant la compression, cet effort axial excentré provoque un moment, faisant fléchir le ressort jusqu'à ce qu'un autre point du fil atteigne la surface d'appui. Alors, une force de contact associée est créée. Cette force évolue, tout comme la position de ce contact, tendant vers un état d'équilibre. Il peut être considéré, après cette stabilisation, que les spires d'extrémités ont un impact limité sur la compression restante. Afin de bâtir leur modèles, ils développent la matrice de rigidité d'un élément courbe en se basant sur les travaux de R.Palanimathan et P.S.Chandrasekharan [9] et de C.Dym [10]. Ils calculent géométriquement le point de contact de la spire et montent la matrice de rigidité globale du ressort. En appliquant les bonnes conditions limites, ils obtiennent des courbes trilineaires qui se superposent aux données expérimentales. Ils soulignent également que ces phénomènes sont plus importants chez les ressorts à index et nombre de spires actives faibles.

La présente étude tente d'établir un modèle analytique similaire pour les ressorts de compression cylindriques à extrémités rapprochées et meulées. Pour ce faire, une analyse géométrique de ces ressorts va être réalisée et le modèle de Cadet va être adapté afin de prendre en compte un éventuel défaut.

## 2. ANALYSE DE LA SOURCE DE LA NON-LINEARITE

Le modèle de Cadet repose sur la définition précise de la géométrie et la non linéarité est expliquée par le non parallélisme des extrémités ce qui provoque un déséquilibre et une modification des points de contacts. Or, pour des ressorts meulés, les surfaces d'appuis sont considérées parallèles quelque soit la géométrie de la spire d'origine du fait de la méthode d'usinage.

Afin de comprendre ce qu'il se produit lors de la compression et de détecter la source de leur non-linéarité, l'ensemble des ressorts testés dans le cadre de l'étude [7] sont réétudiés avec une attention particulière aux spires d'extrémités. Les mesures d'inclinaisons des surfaces d'extrémité et tests de compression montrent alors une forte corrélation entre les ressorts adoptant un comportement non linéaire et l'inclinaison relative entre les deux surfaces meulées des ressorts. En effet, une simple inclinaison de quelques degrés entre les plans inférieur et supérieur du ressort provoquerait une forte non linéarité dans le comportement effort-longueur des ressorts ayant notamment des index et nombre de spires faibles. Soit  $\varphi$  l'angle en radians de défaut de parallélisme entre les deux plans d'appuis. L'ensemble des 36 ressorts testés ont un défaut de parallélisme  $\varphi$  variant entre 0 et 0.086rad, soit entre 0 et 4.9°.

Dans l'optique de vérifier que ce défaut est bien à l'origine de manière prépondérante sur la non linéarité de la courbe effort-longueur de ces ressorts, plusieurs

exemplaires d'un même ressort ont été fabriqués par impression 3D plastique avec un défaut plus ou moins prononcé de parallélisme. Les dimensions constantes de ces ressorts sont (en prenant la dénomination des variables de l'étude [8]  $m_a$  est le pas des spires actives) :  $D = 40\text{mm}$ ,  $d = 6\text{mm}$ ,  $m_a = 15\text{mm}$ ,  $n_a = 2$ . Afin de mettre en évidence de manière exagérée ce phénomène, les défauts sont de 0, 1, 2 et 5° (Figure 1). Le défaut est réalisé sur les modèles numériques de manière symétrique par 2 plans inclinés de  $\varphi/2$  au centre de l'axe du ressort de telle sorte que le sommet du plan se situe à l'extrémité coupée du fil. Cela correspond au cas le plus récurrent sur les ressorts testés expérimentalement.

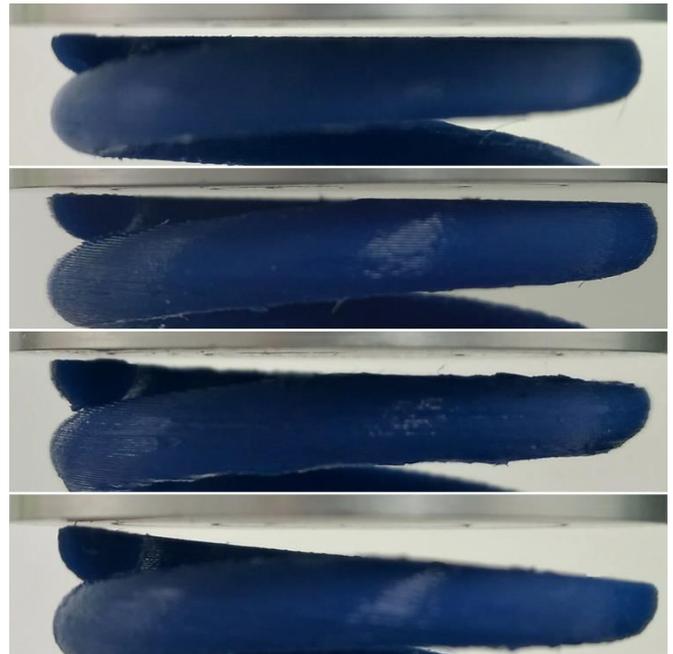


Figure 1 - Observation du défaut de parallélisme de 0, 1, 2 et 5° sur des ressorts non guidés

Des mesures par métrologie optique ont été réalisées sur un instrument de mesure topographique ALICONA avec une résolution verticale de 10nm et une justesse de 1 $\mu\text{m}$ . Elles ont permis de vérifier que les défauts de parallélisme créés sur les modèles numériques sont bien semblables à ceux après impression sur les ressorts fabriqués.

Des tests en compression ont alors été réalisés. Les résultats sont visibles sur la Figure 2.

Comme prédit, la non linéarité dans le comportement mécanique de ces ressorts est directement corrélée à l'amplitude du défaut de parallélisme entre les plans issus du meulage des extrémités. Plus l'angle de défaut augmente, plus le délai de contact est grand, et plus l'écart entre la force attendue par l'équation classique et la force réelle augmente. Cela peut poser d'importants problèmes de fiabilité du produit. En effet, le ressort avec 5° de défaut admet 18.2% d'erreur d'effort avec la courbe théorique pour  $L=25\text{mm}$  et plus de 42.7% pour  $L=38\text{mm}$ . De plus, la raideur finale, identique à tous les ressorts testés, même pour le ressort n'ayant pas de défaut de parallélisme, reste inférieure à la raideur calculée par les normes. Cela

prouve une nouvelle fois l'intérêt qui doit être apporté au choix des simplifications dans les calculs de raideurs des ressorts de compression cylindriques.

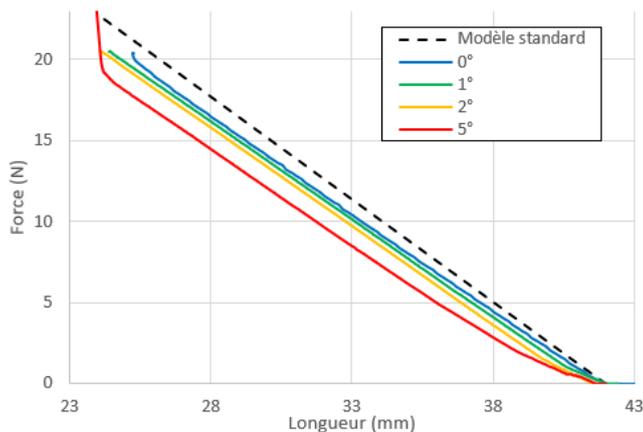


Figure 2 – Courbes effort-longueur des ressorts ayant un défaut de parallélisme de 0, 1, 2 et 5°

### 3. CREATION DU MODELE ANALYTIQUE

#### 3.1. Sélection d'un ressort particulier avec un comportement bilinéaire marqué

Parmi tous les ressorts testés dans la première étape, un ressort s'est démarqué par son défaut de parallélisme prononcé. Ce ressort a les caractéristiques suivantes :  $D = 14.36 \text{ mm}$ ,  $d = 1.8\text{mm}$ ,  $m_a = 4.69\text{mm}$ ,  $n_a = 2$ . Ses propriétés matériaux ont été estimées à  $G = 73500\text{MPa}$  et  $E = 180000\text{MPa}$ . Afin de confirmer que ce défaut est majoritaire dans l'origine de la non linéarité du comportement du ressort métallique, un ressort identique a été modélisé en 3D en prenant en compte le défaut de parallélisme des plans. Les dimensions ont été triplées afin d'amplifier la visualisation du phénomène (Figure 3), puis le ressort a été imprimé en PLA.



Figure 3 – Ressort métallique d'origine (à gauche) et sa réplique en impression 3D plastique aux dimensions triplées (à droite)

Des mesures optiques ponctuelles le long de chaque plan ont permis de vérifier que le défaut de parallélisme était semblable entre les deux ressorts. Ces mesures ont été réalisées avec le même instrument que celui utilisé en Section 2. Les tests de compression révèlent la forte

homothétie entre le comportement des ressorts, en termes de longueur relative et d'efforts respectifs (Figure 5, courbes bleue et orange). En effet, à un facteur d'échelle près, les deux courbes sont similaires et mettent en valeur le même phénomène. Cela permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle l'origine de la bilinéarité dans le comportement effort-longueur du ressort est majoritairement issue du défaut de parallélisme des extrémités.

#### 3.2. Adaptation du modèle de G. Cadet

Afin de pouvoir prédire ce genre de phénomènes, le modèle de G. Cadet [8] a été modifié pour s'adapter aux ressorts aux extrémités rapprochées et meulées. Ainsi, plusieurs modifications ont été apportées : modifications de la longueur libre et longueur à spires jointives, adaptation du paramètre  $f$  permettant de définir la géométrie des spires d'extrémités et retrait de la phase de résolution concernant la stabilisation du point de contact.

Les longueurs  $L_0$  et  $L_c$  sont mises à jour dans le modèle, prenant désormais en compte la quantité de fil meulé à chaque extrémité.

Le facteur  $f$  ne représente plus le facteur de l'angle d'hélice des spires d'extrémités mais désormais le défaut de parallélisme et se calcule par :

$$f = \frac{D \cdot \tan \frac{\varphi}{2}}{m_e \cdot p_2} \quad (2)$$

Avec  $m_e$  le pas des spires d'extrémités (généralement égal à  $d$ ) et  $p_2$  la coordonnée angulaire du point de contact en pourcentage de la spire d'extrémité (pris égal à 0.5, soit 50%, dans le cas d'un second contact supposé en face du premier point de contact).

Le ressort ainsi modélisé par ces formulations semi-analytiques par éléments finis correspond à un ressort non meulé de mêmes dimensions que le ressort désiré, dont le facteur  $f$  permet désormais de représenter le défaut de parallélisme et dont les longueurs caractéristiques du ressort ont été ajustées. L'hypothèse est donc qu'un ressort meulé avec un défaut de parallélisme  $\varphi$  se comporte de manière identique sur une courbe effort-déflexion qu'un ressort non meulé de mêmes dimensions avec un facteur de pente de spires d'extrémité  $f$  associé, calculé selon l'équation (2).

Cette hypothèse a été vérifiée en confrontant les comportements mécaniques du ressort précédemment fabriqué, ayant un défaut de parallélisme  $\varphi = 0^\circ$ , à un ressort également imprimé en 3D et en PLA de mêmes dimensions mais non meulé avec un facteur  $f = 0$ . Leur courbes effort-déflexion sont visibles sur la Figure 4.

Aussi, la deuxième phase de résolution du modèle d'origine a été supprimée. En effet, il est inutile de simuler une phase de stabilisation du point de contact dans le cas d'une mise en contact plan. Il est donc ici supposé que les plans meulés sont parfaits géométriquement. Le ressort dans le modèle est donc guidé axialement, et uniquement

les extrémités des spires sont en contact avec la surface d'appui. La force de compression est donc excentrée de l'axe d'enroulement du ressort. Cette force crée un moment qui fait fléchir le ressort jusqu'à ce que le plan meulé vienne en contact avec la surface d'appui. D'ici, le ressort peut alors être comprimé jusqu'à sa longueur à spires jointives.

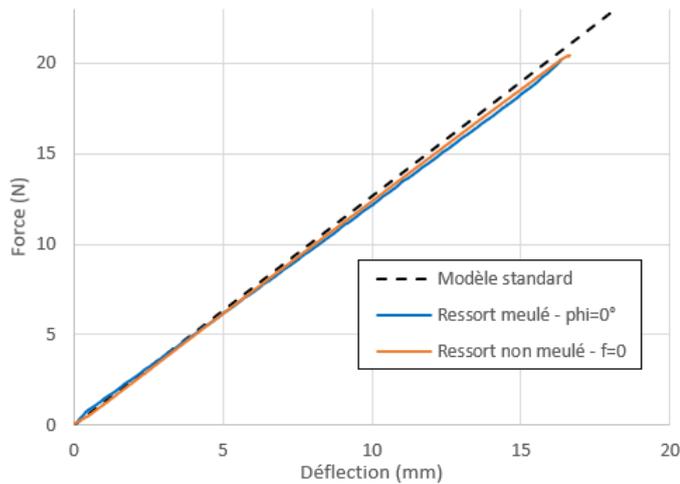


Figure 4 - Courbes effort-déflexion d'un ressort meulé et non meulé à géométries équivalentes

#### 4. RESULTATS

Le modèle analytique ainsi mis à jour a été lancé avec comme paramètres d'entrée ceux du ressort d'origine

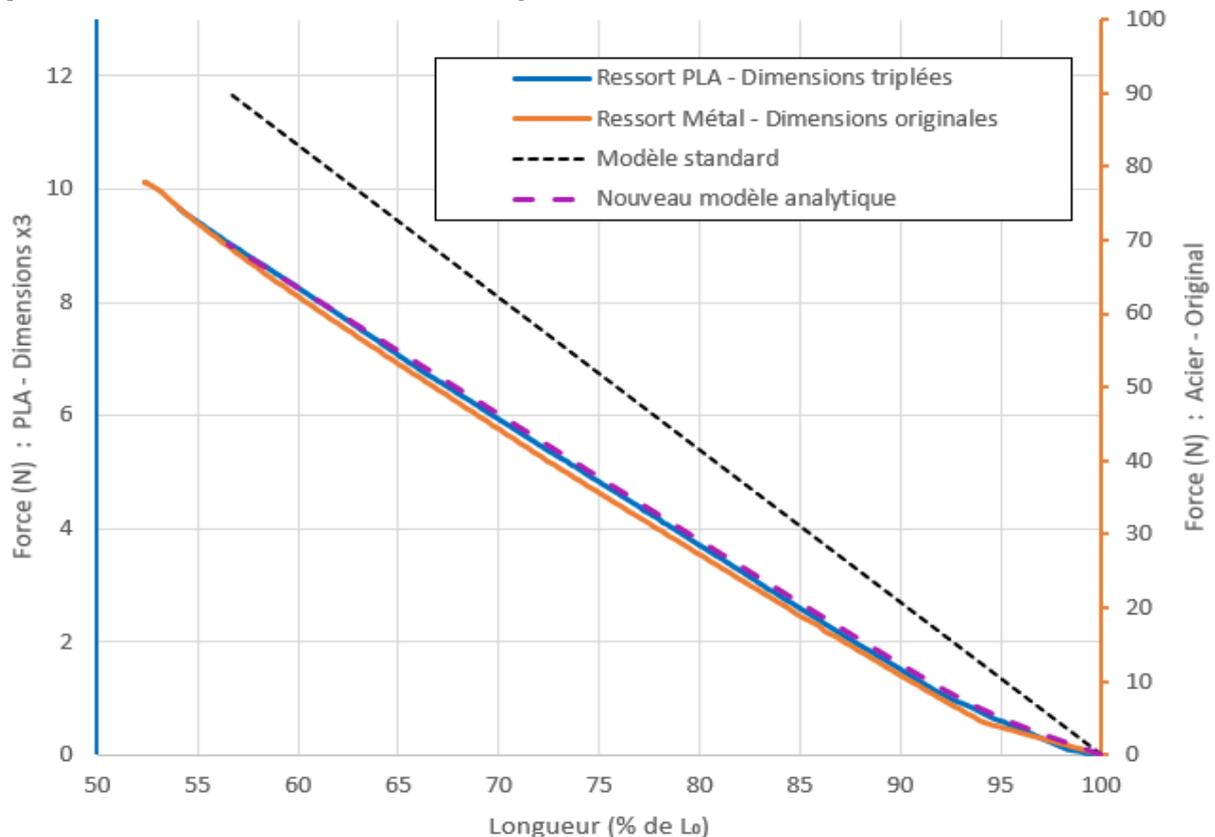


Figure 5- Ressort métallique d'origine (à gauche) et sa réplique en impression 3D plastique aux dimensions triplées (à droite)

dont les propriétés matériaux sont davantage maîtrisées que celles du ressort issu d'impression 3D. En résulte une courbe bilinéaire visible sur la Figure 5. Elle se superpose avec succès avec les données expérimentales du ressort métallique et plastique, tandis que le modèle analytique issu des standards reste très éloigné du comportement réel des ressorts.

Ce modèle primaire standard ne permet pas de décrire le comportement mécanique réel des ressorts de compression cylindriques à pas constant à extrémités meulées et rapprochées en négligeant l'influence de la géométrie des spires d'extrémités, les défauts de fabrication, le comportement spatial des différentes spires et les efforts engendrés par l'application d'une force axiale non coaxiale à l'axe principal du ressort.

Le modèle présenté ici, fondé sur les travaux préliminaires de G. Cadet et al. [8], considère l'ensemble de ces paramètres et ne s'autorise que des hypothèses simplificatrices particulières qui ont été prouvées expérimentalement comme justifiées. Il dissocie deux phases de compression : lorsque la charge n'est appliquée qu'en deux points du ressort situés à ses extrémités, excentrées de l'axe du ressort, jusqu'à la mise en contact complète des plans meulés des spires d'extrémités, où la compression est mieux équilibrée, et ce, jusqu'à la longueur à spires jointives.

## 5. CONCLUSION

Depuis plusieurs décennies, l'équation régissant le comportement mécanique des ressorts de compression cylindriques est connue. Elle est adoptée par l'ensemble des normes et standards. Néanmoins, elle admet beaucoup de simplifications qui retirent un nombre important de paramètres. Aussi, il a été régulièrement relevé que pour les ressorts à index et nombre de spires actives faibles, cette formule admet une erreur de raideur élevée. Or, dans les applications spatiales, médicales ou aéronautiques, augmenter la précision sur le comportement et caractéristiques mécaniques des ressorts devient un enjeu primordial, permettant d'assurer un haut niveau de performance et permettant de meilleures optimisations de masse ou de volume. De récents travaux ont permis de modéliser avec succès de manière plus précise les phénomènes mis en jeu lors de la compression des ressorts à extrémités rapprochées non meulées. Malheureusement, ce phénomène semble aussi présent chez les ressorts meulés.

Une démarche scientifique a donc été menée afin d'analyser les éventuelles sources de cette non linéarité chez cette dernière catégorie de ressorts. Ces recherches ont révélé une forte corrélation entre la présence de non linéarité et le défaut de parallélisme des surfaces meulées du ressort. Puis, une proportionnalité remarquable a permis de prouver que plus le ressort possède un défaut important, plus sa bilinéarité sera marquée. Enfin, la création d'une réplique d'un ressort métallique comportant un défaut important de parallélisme et sa confrontation au comportement initial ont permis de révéler que ce paramètre est majoritairement responsable de ce phénomène. Il en a donc été déduit que la prise en compte de ce défaut permet à lui seul, intégré dans le bon modèle, de prédire le comportement mécanique du ressort avec une précision grandement améliorée par rapport aux formules usuelles.

Puis, un nouveau modèle analytique a été élaboré en prenant l'ensemble de la géométrie du ressort : son diamètre moyen  $D$ , son diamètre de fil  $d$ , le pas  $m_a$  et le nombre  $n_a$  de ses spires actives, ses modules de cisaillement  $G$  et d'Young  $E$ , ainsi que son défaut de parallélisme  $\varphi$ . Le ressort modélisé par des formulations semi-analytiques par éléments finis correspond ainsi à un ressort à extrémités rapprochées non meulées de mêmes dimensions que le ressort désiré, dont le facteur  $f$  permet de représenter le défaut de parallélisme et dont les longueurs caractéristiques du ressort ont été ajustées. Ce modèle suppose que les plans meulés sont parfaits géométriquement et que le ressort est guidé axialement, et uniquement les extrémités des spires sont en contact avec la surface d'appui en début de compression. La force de compression est donc excentrée de l'axe d'enroulement du ressort. Cette force crée un moment qui fait fléchir le ressort jusqu'à ce que le plan meulé vienne en contact avec la surface d'appui. D'ici, le ressort peut alors être comprimé jusqu'à sa longueur à spires jointives.

Ce modèle a été confronté avec succès avec des résultats expérimentaux. La courbe bilinéaire analytique

se superpose parfaitement aux courbes expérimentales, tandis que la droite issue des standards admet une erreur importante tout le long de la compression. Cela prouve une nouvelle fois que la géométrie des spires d'extrémités ne doit plus être négligée.

Cet outil peut simplifier la phase de dimensionnement des ressorts de compression en évitant aux chercheurs et ingénieurs de devoir utiliser des logiciels à éléments finis gourmands en temps de calculs. Cela met également en garde les fabricants de ressorts sur l'attention qui doit être apportée au défaut de parallélisme des surfaces meulées afin d'assurer une chaîne de production fiable.

Ces travaux peuvent être améliorés en étudiant par exemple des ressorts meulés mais à nombre de spires non entier ou avec des défauts non symétriques. En effet, les défauts considérés dans cette étude sont symétriques et modélisés de telle sorte que le sommet de chaque plan se situe à l'extrémité du fil. Des défauts non symétriques pourraient amener à des comportements plus complexes. De plus, la raideur des éléments du modèle des spires d'extrémités ne prend pas en compte la diminution de rigidité due à l'enlèvement de matière liée au meulage. Cela ne semble pas créer d'incohérences mais cela pourrait devenir un prochain axe de recherche. Enfin, le modèle n'a été comparé qu'à une géométrie de ressort. Même s'il se trouve que ce ressort était celui qui comportait le plus grand défaut de parallélisme de l'ensemble de l'échantillon des 36 ressorts testés, une campagne de fiabilité pourrait également être menée sur un nombre de comparaisons plus important.

## RÉFÉRENCES

- [1] Wahl A.M., Mechanical Springs, Deuxième édition. McGraw-Hill Book Company, 1963.
- [2] Saleh M.A.E., Ragab A.E., Ti-6Al-4V Helical Spring Manufacturing via SLM: Effect of Geometry on Shear Modulus. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2, 2013.
- [3] Gubeljak N., Vejborný V., Mechanical springs. Maribor University.
- [4] Ekert E.C., Effects on Rate Due to End Turns in Automotive Suspension Coil Springs. Journal of passenger cars, SAE International, 98(6):277-283, 1989.
- [5] Patil R.V., Reddy P.R., Laxminarayana P., Comparison of Cylindrical and Conical Helical Springs for their Buckling Load and Deflection. International Journal of Advanced Science and Technology, 73:33-50, 2014.
- [6] Shimoseki M., Hamano T., Imaizumi T., FEM for Springs. Springer-Verlag Berlin, 2003.
- [7] Paredes M., Enhanced Formulae for Determining Both Free Length and Rate of Cylindrical Compression Springs. Journal of Mechanical Design, 138, 2016.
- [8] Cadet G., Paredes M., Orciere H., Improved analytical model for cylindrical compression springs not ground considering end behavior of end coils. Mechanics & Industry, 22(50), 2021.
- [9] Palaninathan R., Chandrasekharan P.S., Curved beam element stiffness matrix formulation. Comput. Struct., 21:663-669, 1985.
- [10] Dym C., Consistent derivations of spring rates for helical springs. ASME Journal of Mechanical Design, 131, 2009.



# Modélisation et caractérisation des structures hybrides bois/aluminium pour une utilisation future comme glissières de sécurité de ponts routiers

Gotre Bi Djeli Bienvenu. Boli <sup>a,b</sup> \*, Daniel. Coutellier <sup>a</sup>, Marc. Oudjene <sup>b</sup>, Hakim. Naceur <sup>a</sup>

<sup>a</sup> LAMIH, UMR CNRS 8201, INSA Hauts-de-France, Université Polytechnique Hauts-de-France, 59313 Valenciennes Cedex 9, France

<sup>b</sup> Département de génie civil et génie des eaux, Université Laval, 1065 avenue de la Médecine, Québec, Canada

\* E-Mail : Gotre.Boli@uphf.fr

## 1. INTRODUCTION

Selon son rapport annuel publié en 2020, le Ministère des Transports du Québec (MTQ), déclare assumer la gestion de 5495 ouvrages d'art parmi lesquels 4264 ponts dont l'âge moyen est d'environ 40,3 ans. Selon le bilan de l'état des chaussées du réseau routier supérieur québécois, environ 20% de ces ouvrages d'art présentent des défaillances causées notamment par l'écoulement des eaux et l'utilisation de sel de déglacage sur les dalles de béton des ponts. Le sel s'infiltre dans le béton et cause la corrosion des armatures en acier. Le MTQ est donc confronté à des coûts importants et croissants d'entretien de première urgence de son parc de ponts. Compte tenu de cette dégradation des ponts, généralement constitués d'un tablier en béton, et des coûts élevés d'entretien qui en découlent, une solution est recherchée afin de réduire les coûts et l'impact environnemental. L'utilisation de matériaux locaux, durables et recyclables tels que le bois et l'aluminium conduit à une alternative prometteuse dans la conception. Le bois et l'aluminium font partie d'un programme de valorisation à l'échelle du Canada et du Québec visant en particulier à renforcer les filières québécoises de l'aluminium [1] et du bois d'ingénierie [2]. Le bois possède un fort potentiel de disponibilité et de valorisation dans les pays tels que le Canada et la France et constitue, de nos jours, une solution d'écoconception.

La publication par le gouvernement du Québec en 2013 de la charte du bois [2] et en 2015 de la Stratégie québécoise de développement de l'aluminium [1] a pour objectif de promouvoir l'utilisation du bois et de l'aluminium dans la construction et la réhabilitation d'ouvrages d'art. Dans ce contexte, Djedid et al. [3] et Beudon et al. [4] se sont intéressés à la possibilité d'utiliser du bois et de l'aluminium comme matériau de

construction pour un tablier de pont. Le bois et l'aluminium peuvent être utilisés de plusieurs manières, à savoir comme platelage de ponts pour la rénovation ou encore pour la construction d'un nouveau pont [5].

Cependant, dans un contexte de changement climatique et de préservation de l'environnement, une analyse économique et environnementale du cycle de vie de ces types de ponts utilisant le bois et l'aluminium est nécessaire. Dans ce contexte, une étude d'un pont routier à platelage en aluminium sur poutres en bois lamellé-collé menée par Beudon et al. [4] et d'un pont à platelage en aluminium sur des poutres en acier menée par Pedneault et al. [6] ont montré que les coûts, comparés à ceux d'un pont conventionnel équivalent en béton sur poutres en acier, sont plus avantageux.

Dans nos travaux, le bois et l'aluminium sont envisagés pour la conception de glissières de sécurité sur ponts routiers.

Le Manuel d'inventaire des structures [7] du MTQ propose l'utilisation de différents matériaux pour la construction des glissières de sécurité sur les ponts, à savoir : le béton régulier, le béton BHP, l'acier, l'aluminium, le bois. Pour des glissières de sécurité multi-matériaux, les choix possibles sont : Béton/acier, Bois/acier, Acier/aluminium. Des glissières de sécurité combinant le bois et l'aluminium sont actuellement peu utilisées.

Le développement d'un nouveau dispositif de retenue (glissières de sécurité) pour les ponts routiers exige des essais de choc à grandeur réelle qui peuvent être très dispendieux en termes de temps et de coûts. Dans ce contexte, la simulation numérique se présente comme

une alternative afin de permettre la réduction voire la suppression des essais expérimentaux.

Une nouvelle génération de glissières de sécurité hybride en bois confiné dans une enveloppe en aluminium est envisagée. Le bois est connu pour ses grandes capacités d'absorption de choc et l'aluminium comme élément protecteur contre les intempéries, en plus d'être léger, résistant à basse température et à la corrosion. L'aluminium réduit et retarde également les modes de rupture fragile du bois.

La présente étude s'intéresse à la modélisation par éléments finis de différentes structures hybrides bois/aluminium incluant du bois confiné. La possibilité d'utiliser la loi matériau MAT-143-WOOD du logiciel LS-DYNA pour la modélisation du bois et du bois confiné est explorée. Les résultats numériques sont corrélés aux résultats expérimentaux.

## 2. MODELISATION ELEMENTS FINIS D'ASSEMBLAGES HYBRIDES BOIS/ALUMINIUM

Différentes structures hybrides bois/aluminium disponibles dans la littérature ont été sélectionnées afin d'évaluer la modélisation du bois et du bois confiné avec la loi matériau MAT-143-WOOD pour différentes géométries et différents cas de chargement. Des essais de flexion trois points ont été réalisés sur des goujons en bois densifié et des goujons hybrides en bois confiné proposés par Rollo [8]. Des essais de traction en double cisaillement sur des structures hybrides constituées de bois lamellé-collé (BLC) et d'une platine en aluminium assemblés avec des goujons en acier galvanisé et des goujons hybrides en bois confiné ont été analysés par Tétreault [9].

### 2.1. Lois matériaux

#### 2.1.1. Modèle matériau pour le bois : MAT-143-WOOD

À l'échelle macroscopique, le bois est considéré comme un matériau orthotrope avec différentes propriétés suivant la direction considérée : longitudinale (L ou 1), radiale (R ou 2) et tangentielle (T ou 3). Le modèle matériau MAT-143-WOOD [10] de LS-DYNA est basé sur l'hypothèse de comportement isotrope transverse. Ce modèle utilise un critère de plasticité de Hashin en considérant deux critères de rupture (fragiles) parallèle  $f_{||}$  et perpendiculaire  $f_{\perp}$  aux fils suivants les équations (1) et (2) respectivement :

$$f_{||} = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} + \frac{(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)}{S_{||}^2} - 1 \quad (1)$$

$$f_{\perp} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{\perp}^2} - 1 \quad (2)$$

avec  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{23}$  les composantes de contraintes,  $X$  et  $Y$  les contraintes limites à la rupture en traction et compression dans les directions longitudinale et transverse.  $S_{||}$  et  $S_{\perp}$  représentent les contraintes limites à la rupture en cisaillement suivant les directions longitudinale et transverse. La rupture a lieu dans la direction parallèle lorsque  $f_{||} > 0$  et dans la direction perpendiculaire lorsque  $f_{\perp} > 0$ .

L'évolution de l'endommagement suit différentes lois pour les modes parallèle et perpendiculaire et est gouvernée respectivement par les équations (3) et (4) :

$$d(\tau_{||}) = \frac{d_{max||}}{B} \left[ \frac{1+B}{1+Be^{-A(\tau_{||}-\tau_{0||})}} - 1 \right] \quad (3)$$

$$d(\tau_{\perp}) = \frac{d_{max\perp}}{D} \left[ \frac{1+D}{1+De^{-C(\tau_{\perp}-\tau_{0\perp})}} - 1 \right] \quad (4)$$

$B$  et  $D$  sont des paramètres d'adoucissement qui déterminent l'allure de la courbe après la rupture et sont obtenus par calibration à l'aide d'essais expérimentaux.  $A$  et  $C$  sont calculés par la loi matériau à l'aide des valeurs d'énergie de rupture  $G_f$  selon les équations (5) et (6) :

$$A = \tau_{0||} L \left( \frac{1+B}{BG_{f||}} \right) \log(1+B) \quad (5)$$

$$C = \tau_{0\perp} L \left( \frac{1+D}{BG_{f\perp}} \right) \log(1+D) \quad (6)$$

Les paramètres de la loi de comportement utilisé dans cette étude, sont résumés dans le Tableau 1. Ils ont été déterminés expérimentalement pour certains et par identification inverse pour d'autres.

#### 2.1.2. Modèle matériau pour l'aluminium : MAT-024-Linear Piecewise Plasticity

Le comportement de l'aluminium est modélisé en utilisant le modèle matériau MAT-024 de LS-DYNA qui décrit le comportement d'un matériau élasto-plastique avec prise en compte de la vitesse de déformation en utilisant le modèle de Cowper et Symonds. L'évolution de la déformation en fonction de la contrainte est décrite en utilisant l'équation (7) donnée par Ramberg-Osgood :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (7)$$

avec  $E$  le module d'élasticité de l'aluminium et  $K$  et  $n$  les paramètres d'écrouissage.

**Tableau 1 : Paramètres matériau pour le bois densifié et le bois lamellé-collé (paramètre LS-DYNA entre parenthèses)**

Paramètre [unité]	Bois densifié (épicéa densifié)	Bois lamellé-collé (BLC)
$\rho = \rho_{wood}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1174	560
$E_L$ (EL) [MPa]	30000	1200
$E_T$ (ET) [MPa]	2000	480
$G_{LT}$ (GLT) [MPa]	1750	720
$G_{TR}$ (GTR) [MPa]	1000	130
$\nu_{LT}$ (PR) [-]	0,41	0,26
$f_{t,L}$ (XT) [MPa]	125	60
$f_{c,L}$ (XC) [MPa]	120	50
$f_{t,T}$ (YT) [MPa]	12,5	3,5
$f_{c,T}$ (YC) [MPa]	104	13,5
$f_{v,L}$ (SXY) [MPa]	85	6,5
$f_{v,T}$ (SYZ) [MPa]	120	6,5
$G_{f,L,I}$ (GF1  ) [MPa.mm]	40,5	25
$G_{f,L,II}$ (GF2  ) [MPa.mm]	291,5	90
$G_{f,T,I}$ (GF1P) [MPa.mm]	1,35	0,24
$G_{f,T,II}$ (GF2P) [MPa.mm]	2,75	0,7
$B$ (BFIT)	300	30
$D$ (DFIT)	300	30
$d_L$ (DMAX  )	0,9999	0,9999
$d_T$ (DMAXP)	0,9900	0,9900

Les paramètres matériaux utilisés pour l'aluminium sont les suivants :

- Densité : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Module d'Young : 70000 MPa
- Coefficient de Poisson : 0,33
- Limite d'élasticité : 210 MPa
- Ecrouissage de l'aluminium 6061-T6 :  $n = 45$  pour une déformation à l'ultime de 8% prescrite par l'Eurocode 9.

### 2.1.3. Modèle matériau pour l'acier : MAT-003-Plastic Kinematic

Pour l'acier un modèle de comportement élastoplastique avec écrouissage cinématique a été adopté (MAT-003 de LS-DYNA), prenant en compte l'effet de vitesse de déformation par la loi de Cowper et Symonds. Les paramètres utilisés pour l'acier sont :

- Densité : 7877 kg/m<sup>3</sup>
- Module d'Young : 210000 MPa
- Coefficient de Poisson : 0,33
- Limite d'élasticité : 450 MPa

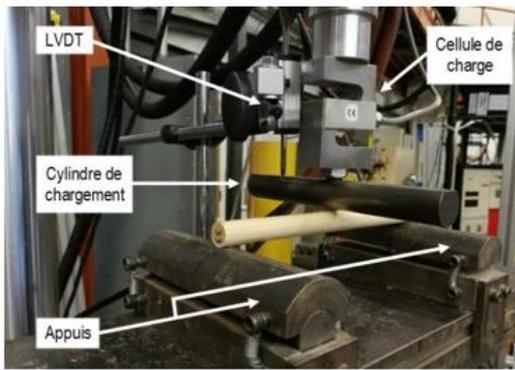
### 2.2. Essai de flexion trois points sur goujon hybride en bois confiné

Le modèle EF du test de flexion trois points est réalisé d'abord pour un goujon en bois densifié puis pour un goujon hybride en bois confiné. La Figure 1.b représente le modèle EF utilisé et la Figure 1.a représente l'expérimentation réalisée par Rollo et al. [8]. Le modèle EF du goujon en bois densifié est réalisé avec des éléments solides hexaédriques à 8 nœuds. Les éléments à contrainte constante (EFLORM 1) avec un seul point d'intégration sont utilisés pour le maillage du bois densifié. La vitesse de la traverse utilisée lors des essais est de **5 mm/min** ce qui s'apparente à un test de type quasi-statique.

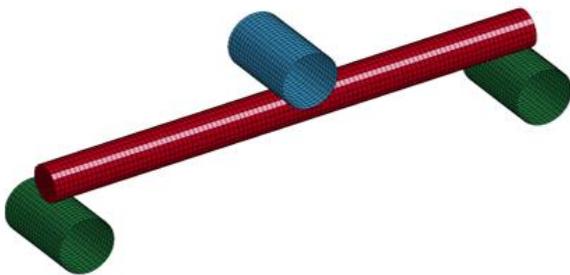
Le cylindre de chargement et les appuis ont été maillés avec des éléments de coque de type ELFORM16 et sont considérés comme des matériaux rigides dans le modèle.

Le goujon hybride en bois confiné (Figure 2) est réalisé par l'ajout d'une enveloppe d'aluminium au goujon en bois densifié. Le tube d'aluminium est maillé à l'aide d'éléments solides hexaédriques à 8 nœuds de type ELFORM1.

Les conditions aux limites utilisées dans le modèle EF pour le goujon hybride sont les mêmes que celles utilisées pour le goujon en bois densifié.



(a) Test expérimental



(b) Modèle EF

Figure 1 : Test de flexion trois points pour le goujon en bois densifié

### 2.3. Essai de traction en cisaillement double sur des assemblages hybrides bois/aluminium

Deux séries d'essais (Figure 3) de traction sous charge monotone sont réalisées sur des assemblages hybrides. La première série d'essais concerne les assemblages hybrides bois/aluminium avec des goujons en acier

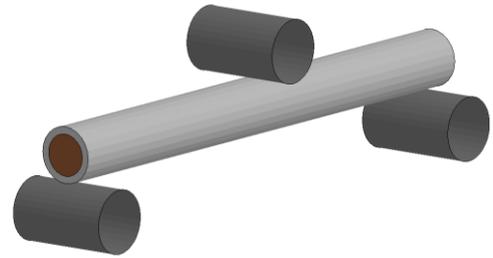
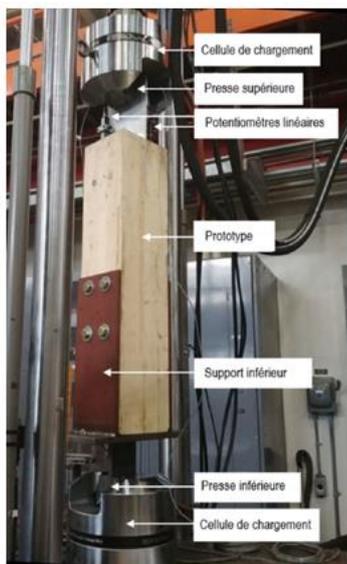


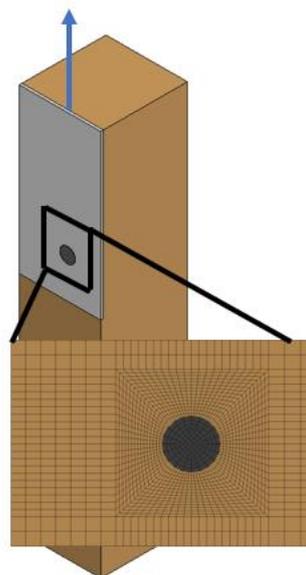
Figure 2 : Modèle EF du test de flexion trois points du goujon hybride en bois confiné

galvanisé et la deuxième série d'essais concerne des assemblages hybrides bois/aluminium avec des goujons hybrides bois/aluminium en bois confiné. Les assemblages sont réalisés avec des membrures en bois lamellé-collé (BLC) et une platine d'aluminium est insérée entre les deux membrures en BLC et retenue par les goujons.

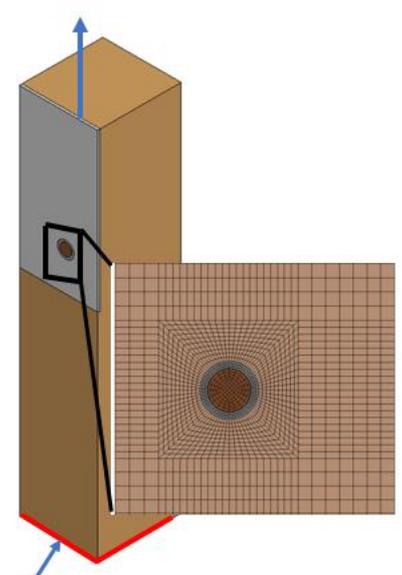
Le modèle EF pour ces deux types d'assemblages est réalisé sous LS-DYNA avec des éléments solides hexaédrique à 8 nœuds de type 1 (ELFORM 1) pour le bois, l'aluminium et l'acier. La présence de deux plans de symétrie permet l'étude d'un quart de l'assemblage en introduisant des conditions de symétrie. Un contact surfacique (*AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE*) est défini entre le bois et l'aluminium avec un coefficient de frottement de 0,3. Lors des tests expérimentaux, une vitesse  $V = 2 \text{ mm/min}$  est imposée à la platine d'aluminium.



(a) Test expérimental



(b) Modèle EF avec goujon en acier galvanisé



(c) Modèle EF avec goujon hybride bois/aluminium

$$U_x = U_y = U_z = 0$$

Figure 3 : Essai de traction en cisaillement double sur des assemblages hybrides en bois aluminium

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Essai de flexion trois points sur goujon hybride en bois confiné

Les résultats des essais de flexion trois points réalisés sur le goujon hybride bois/aluminium sont analysés à partir de la réponse globale des courbes force-déplacement et de la déformée de la structure. La Figure 4 présente une comparaison entre les courbes expérimentales (en couleur traits pleins) et la prédiction du modèle EF (en noir traits pointillés). L'analyse des courbes expérimentales permet de constater une première chute de force qui correspond à la rupture du bois confiné dans l'enveloppe d'aluminium. La charge est ensuite reprise par l'enveloppe d'aluminium jusqu'à la rupture finale de la structure hybride avec la rupture du tube en aluminium. Ces résultats mettent en évidence l'apport du tube d'aluminium contenant la rupture fragile du bois. Une dispersion est aussi observée au niveau des résultats expérimentaux, elle met en évidence le caractère naturel et complexe du bois. Cependant avec les paramètres matériaux identifiés, le modèle a permis de reproduire la moyenne des courbes expérimentales.

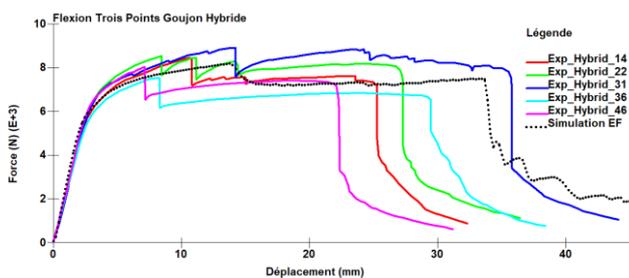


Figure 4 : Courbes Force-Déplacement des essais de flexion trois points sur le goujon hybride

#### 3.2. Essai de traction en cisaillement double sur des assemblages hybrides bois/aluminium

Lors des essais expérimentaux des assemblages bois/aluminium avec le goujon en acier galvanisé, il est possible d'observer, au niveau des éléments en bois, des fissures après rupture de l'assemblage. Il s'agit de fissures verticales dans le sens des fibres (Figure 5.a), à l'emplacement du goujon, qui correspondent à des fissures de fendage et qui sont créées par des contraintes perpendiculaires au sens des fibres causées par le déplacement des goujons. La Figure 5 montre une comparaison entre les mesures expérimentales et la prédiction du modèle numérique. On remarque une cohérence entre les résultats numériques et les observations expérimentales tant au niveau des modes de rupture observés (Figures 5a et 5b) que de la capacité de charge maximale de l'assemblage (Figure 6).

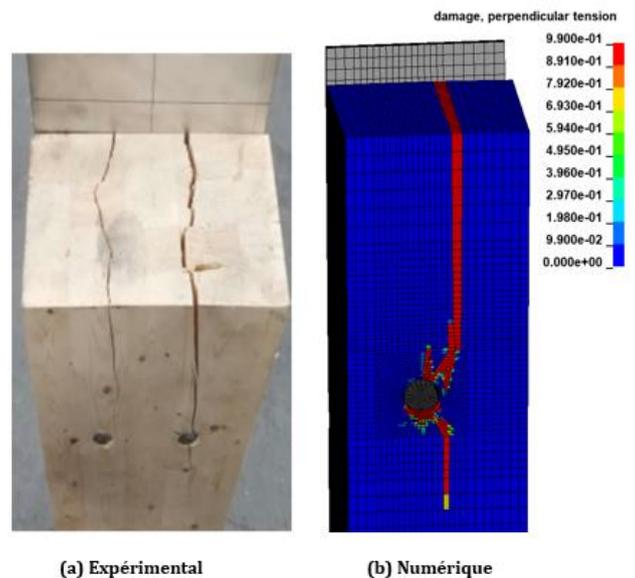


Figure 5 : Rupture par traction transverse de l'assemblage bois/aluminium avec des goujons en acier galvanisé

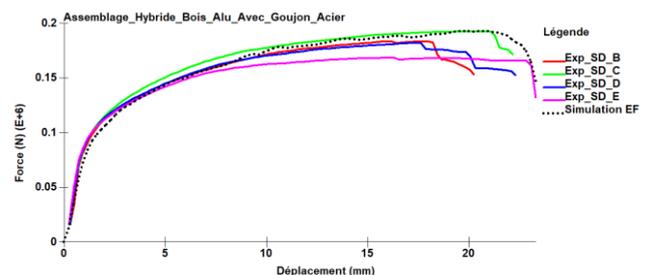


Figure 6 : Courbes Force-Déplacement des essais de traction en cisaillement double sur les assemblages bois/aluminium avec des goujons en acier galvanisé

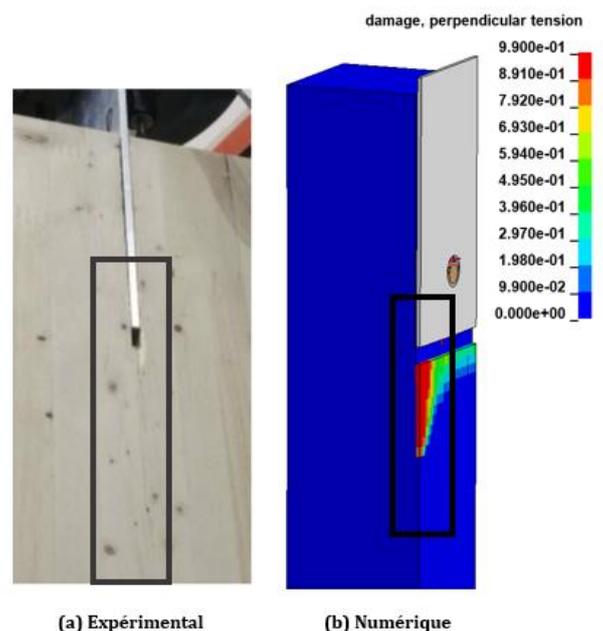


Figure 7 : Rupture par traction transverse de l'assemblage bois/aluminium avec des goujons hybride bois/aluminium

Pour les essais réalisés sur des assemblages hybrides bois/aluminium avec le goujon hybride, il est possible d'observer au niveau des éléments en bois, une fissuration à l'emplacement de la platine en aluminium (Figure 7a). Cette fissuration est causée par la déformation du goujon hybride qui vient se loger dans la rainure du bois lamellé-collé (à la place de la platine en aluminium). Le modèle EF pour ce type d'assemblage est aussi en accord avec les observations expérimentales tant au niveau des modes de rupture observés (Figures 7a et 7b) que de la capacité de charge maximale de l'assemblage (Figure 8). La chute de force observée sur les courbes expérimentales et numérique (Figure 8) est due à la rupture du goujon hybride. Il convient aussi de noter que la traction transverse observée dans le sens du fil avec le goujon en acier galvanisé s'initie aussi dans les membrures de bois avec le goujon hybride. Cependant elle n'arrive pas à se propager du fait de la rupture prématurée du goujon hybride. Ainsi une optimisation du goujon hybride est nécessaire afin d'atteindre les performances du goujon en acier galvanisé.

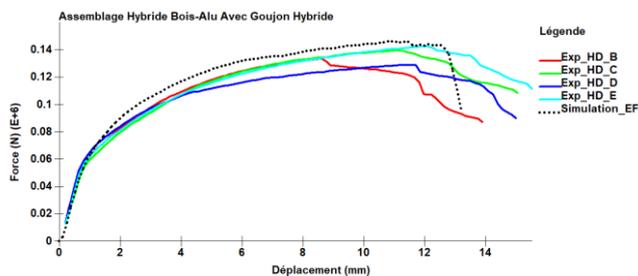


Figure 8 : Courbes Force-Déplacement des essais de traction en cisaillement double sur les assemblages bois/aluminium avec goujons hybride bois/aluminium

#### 4. CONCLUSION

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la modélisation par EF de différentes structures hybrides bois/aluminium incluant du bois confiné avec le logiciel LS-DYNA. La possibilité de modéliser le comportement du bois et du bois confiné en statique à l'aide de la loi matériau MAT-143-WOOD a été explorée. Cette loi peut décrire fidèlement le comportement du bois confiné pour des sollicitations quasi-statiques, et l'initiation et la propagation de la rupture dans le bois. Bien que les résultats numériques soient en bon accord avec les essais expérimentaux, plusieurs travaux sont encore nécessaires afin de pouvoir appliquer un tel modèle dans la phase de développement des glissières de sécurité dont le domaine d'application est la dynamique rapide. Une campagne expérimentale en dynamique est en préparation afin d'évaluer le comportement du bois confiné et sa dépendance à la vitesse de déformation.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants envers le **conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG)** et la **Région Hauts-de-France** pour leur soutien financier.

#### REFERENCES

- [1] Gouvernement du Québec, Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation. *Stratégie québécoise de développement de l'aluminium 2015-2025*. MESI, Montréal, QC, Canada 2015.
- [2] MRN. *Charte du bois*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Montréal, QC, Canada, 2013.
- [3] Djedid A., Guillot M., Desjardins V., Annan C. D., Fafard M. *Design and fabrication of bridge decks made from extruded aluminium*. Journal of Light Metal Welding, 58(Supplement):138s-144s, 2020.
- [4] Beudon C., Oudjene M., Djedid A., Annan C. D., Fafard M. *Life Cycle Assessment of an Innovative Hybrid Highway Bridge Made of an Aluminum Deck and Glulam Timber Beams*. Buildings, 12(10), 1616, 2022.
- [5] Desjardins V. *Construction et observation du pont à platelage en aluminium de Saint-Ambroise*, 2019.
- [6] Pedneault J., Desjardins V., Margni M., Conciatori D., Fafard M., Sorelli L. *Economic and environmental life cycle assessment of a short-span aluminium composite bridge deck in Canada*. Journal of Cleaner Production, 310, 127405, 2021.
- [7] Ministère des Transports de la Mobilité durable et de l'Électrification des Transports. *Manuel d'inventaire des structures*. Québec, QC, Canada, 2017.
- [8] Rollo G. *Étude expérimentale et numérique d'un nouveau goujon hybride bois-aluminium pour les assemblages bois*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 2021.
- [9] Tétreault M. G. *Étude et modélisation de nouveaux assemblages hybrides en bois aluminium*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 2022.
- [10] Murray Y. D. *Manual for LS-DYNA wood material model 143*. No. FHWA-HRT-04-097. United States. Federal Highway Administration, 2007.

# Suivi dynamique de la courbure de la colonne vertébrale : cas de la détection de la scoliose

H. VILLI<sup>a,\*</sup>, G. THOMANN<sup>a</sup>, N. PINSULT<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP\*, G-SCOP, 38000 Grenoble, France\* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes,

<sup>b</sup> TIMC-IMAG, UMR5525, Grenoble INP, Vetagro Sup, University Grenoble Alpes, CNRS, Themis team, Grenoble, France

\* e-mail : hugo.villi@grenoble-inp.fr

## 1. INTRODUCTION

L'analyse du mouvement fait maintenant partie de nombreux domaines de recherches tel que la rééducation [1], l'analyse de la pratique sportive [2], l'évaluation de la gravité de certaines pathologies [3] ou le suivi de la fatigue musculaire durant des tâches répétitives [4]. Différentes méthodes de captures ont été développées avec l'objectif de capturer et de quantifier le mouvement, dans l'exercice de la marche, de la course ou encore des activités quotidiennes, avec un intérêt particulier pour les membres inférieurs ou supérieurs. L'analyse du mouvement de la colonne vertébrale présente elle aussi un intérêt, car les pathologies du rachis peuvent se présenter sous de nombreuses formes et peuvent toucher une partie importante de la population. L'analyse du rachis et de son mouvement est donc présente dans les domaines cités précédemment, que ce soit dans un contexte professionnel [5], [6] ou clinique [7], [8], notamment pour l'une des pathologies rachidiennes la plus répandue, la scoliose idiopathique de l'adolescent [9], [10]. Cette pathologie déforme la colonne vertébrale dans les 3 dimensions [11], avec une rotation des vertèbres sur elles-mêmes. Les vertèbres entraînent avec elles la cage thoracique, ce qui crée une gibbosité, c'est-à-dire une élévation d'un côté de la cage thoracique par rapport à l'autre. Cette déformation est mise en valeur lorsque le patient se penche en avant, en essayant de toucher ses pieds, et c'est le principe du test de flexion antérieur. L'objectif premier de la technologie présentée ici est de suivre dynamiquement la position de la colonne vertébrale durant un test de flexion antérieur, test de référence pour le dépistage de la scoliose.

Ce test de référence est le plus répandu, notamment grâce à sa simplicité d'exécution, mais présente une sensibilité et une spécificité faible [12]. Des compléments à cette technique existent, mais la simplicité d'exécution

est perdue car cela demande un matériel spécifique et des connaissances supplémentaires [13]. Cette difficulté à obtenir des résultats fiables a progressivement mené à une diminution du pourcentage de la population à risque dépistée. La technologie présentée ici a pour but de fournir des informations utiles en limitant au maximum les contraintes d'utilisation, que ce soit du côté patient ou du côté de l'observateur.

Des solutions de captures du mouvement existent comme les systèmes de capture du mouvement optoélectroniques, qui ont déjà été utilisés pour des patients scoliotiques [14]–[16], mais elles imposent une instrumentation chronophage du patient, de part la pose de capteur réfléchissant sur la peau, et un équipement coûteux, en plus de nécessiter un espace de capture important. D'autres solutions sont proposées, comme le système Epionics SPINE pour des captures dynamiques [17] ou le SpinalMouse [18] pour des captures statiques. Mais ces solutions ne remplissent pas les critères prédéfinis de temps de capture et de possibilité de dépistage de masse. En s'appuyant sur quelques travaux précédents, il a été proposé d'utiliser une caméra de profondeur, ici une Kinect V2 de Microsoft, pour extraire les données d'intérêts de la surface du dos [19], [20].

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. Matériel

Une caméra de profondeur est capable de déterminer la distance entre elle-même et l'objet qu'elle filme, c'est-à-dire la « profondeur » de l'objet. Pour cela, cette technologie s'appuie sur un émetteur et un capteur infrarouge, d'une résolution de 512\*424 pixels et d'une fréquence d'acquisition théorique de 30 images par seconde. Le résultat d'une capture est donc une suite de

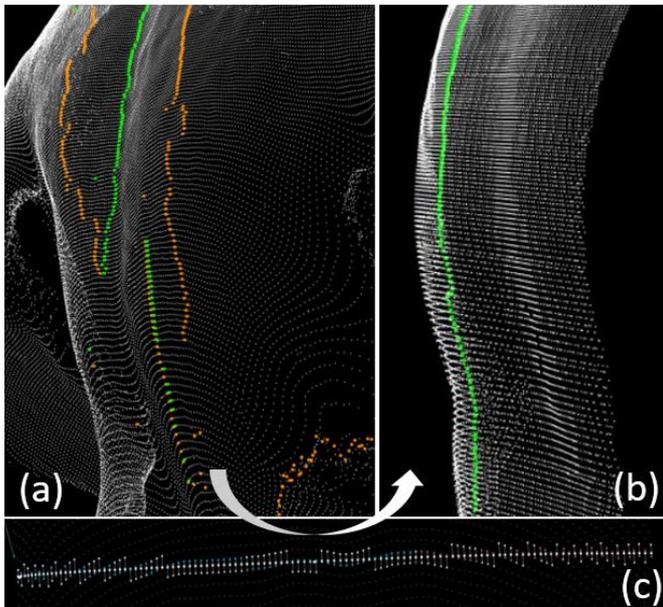


Figure 1- Passage d'un cadrillage caméra-dépendant (a), qui crée des lignes déformées, à un cadrillage patient-dépendant (c), en passant par un algorithme qui utilise les informations existantes pour recréer un maillage (b)

cartographie de la surface du dos sous la forme d'un nuage de point placé dans un repère 3D fixé à la caméra. Le résultat d'une capture peut se visualiser sur la Figure 1.

## 2.2. Conditions de mesure

Pour assurer une capture de qualité, le positionnement de la caméra par rapport au patient a son importance. Les publications précédentes utilisant une caméra de profondeur pour l'analyse du rachis le font généralement sur un patient statique, ce qui permet de capturer le patient sous un ou plusieurs points de vue, en la plaçant au niveau des vertèbres thoraciques du patient à une distance permettant de capturer toute la surface du dos dans le champ de vision de la caméra [19]-[22].

L'objectif présenté ici étant de capturer le dos d'un patient durant l'exécution d'un test de flexion antérieure, plusieurs positionnements de caméra ont été testés afin de filmer le plus de surface possible durant toute la durée du test en limitant les déformations du nuage de point. Cela impactera le traitement du nuage de point qui sera explicité par la suite.

Pour réaliser une capture, il faut donc avoir accès à un espace dégagé d'au moins 2\*3 mètres et pouvoir placer la caméra à la hauteur désirée. La caméra se relie ensuite à une prise secteur et à un port USB sur un ordinateur qui exécutera le logiciel dédié à la prise de capture.

## 2.3. Traitement du nuage de point

Pour faciliter le travail de l'algorithme de la détection de la colonne, plusieurs traitements sont appliqués au nuage de points. Le premier consiste à extraire une région d'intérêt du nuage brut, qui contient le patient et tout l'environnement qui l'entoure. Pour cela, l'arrière-plan est supprimé pour ne garder que le patient, puis les zones sans intérêt pour la détection de la colonne sont supprimées : les bras et les jambes sont exclus de la région

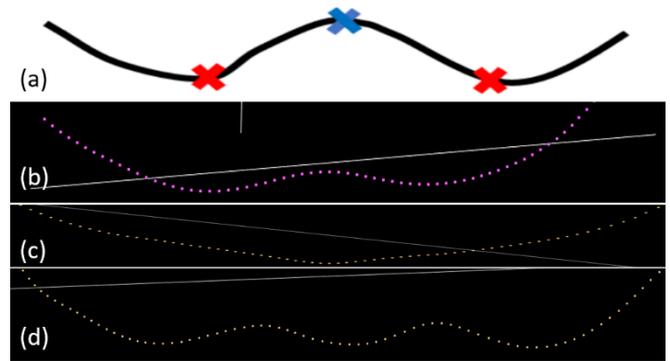


Figure 2 - La courbe classique, qui est celle exploitée dans la littérature (a), et bien retrouvée dans les données capturées (b). La courbe unique (c) ne présente qu'une inflexion, et la courbe double en présente 5 (d).

d'intérêt, pour ne garder qu'un rectangle partant base du cou et descendant jusqu'au sacrum, d'une largeur équivalente à celle des omoplates.

Les points contenus dans cette région d'intérêt sont ensuite lissés avec un filtre Gaussien 2D, ce qui permet de supprimer le bruit de capture tout en limitant la perte d'informations pertinentes.

Le positionnement de la caméra permet de capturer le plus de surface possible pendant l'exécution du test de dépistage. Les données capturées sont organisées sous la forme d'un tableau de taille 512\*424, avec chaque élément du tableau contenant un « pixel » de coordonnées X, Y et Z, exprimé dans le référentiel lié à la caméra. Chaque ligne de ce tableau pourrait potentiellement être utilisée sans post traitement pour exécuter l'algorithme de détection de la colonne, mais le positionnement de la caméra par rapport au patient fournit des lignes de points qui sont trop déformées pour être utilisées. Afin de pallier à ce problème, un remaillage des données a été mis en place. L'objectif est de s'affranchir de l'orientation de la caméra, en se fixant sur l'orientation du thorax du patient. Pour effectuer ce nouvel échantillonnage, des informations extraites de la scène générale et du patient sont utilisées pour retrouver le plan moyen du sol et le plan moyen du dos. L'objectif est d'obtenir un plan perpendiculaire au plan moyen du dos du patient, et de faire « glisser » celui-ci sur toute la longueur de la colonne. Ensuite, pour chaque ligne de points, les points les plus proches au-dessus et en dessous de ce plan sont sélectionnés. Une droite est tracée entre ces deux points, et l'intersection entre cette droite et le plan sera considérée comme le nouveau point (Figure 1 (c)). Ces opérations permettent d'obtenir des lignes de coupes toujours perpendiculaires au plan du dos quelle que soit l'orientation du thorax du patient (Figure 1 (b)).

## 2.4. Classification des types de courbes

La littérature existante se base sur la technique suivante pour détecter le rachis : une coupe transversale de la surface du dos du patient est effectuée, ce qui génère une courbe présentant la forme visible sur la Figure 2 (a). Une fois cette courbe extraite, deux minimums sont recherchés de chaque côté, pour ensuite retrouver un maximum entre les deux. Mais ce profil ne se retrouve

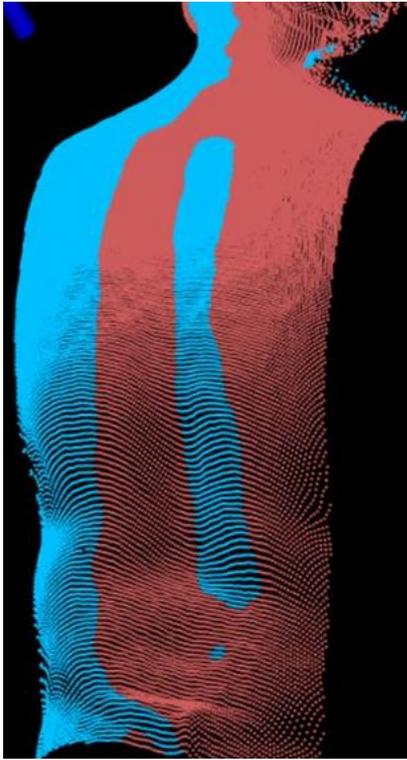


Figure 3 - Résultat de l'algorithme de classification des courbes, avec un traitement polynomial, où l'on observe des courbes classiques au niveau des lombaire (a) et des thoraciques et des courbes uniques au niveau des cervicales (b).

finalement que sur un patient sain, debout, avec un indice de masse corporelle dans la moyenne (globalement entre 19 et 25). D'autres profils peuvent apparaître en fonction de la morphologie du patient. De plus, le profil de la courbe évolue aussi selon le degré d'inclinaison de la cage thoracique durant le test de dépistage. Ainsi, plusieurs types de courbes ont été identifiées dans les nuages de points capturés. La courbe classique, celle identifiée dans la littérature (Figure 2(a) et 2(b)), présente quatre zones, avec une alternance de décroissance-croissance-décroissance-croissance. Cette courbe est générée par la présence de tissus mous de chaque côté des vertèbres. Elle est bien présente au niveau des vertèbres lombaires et thoraciques chez certains participants, mais peut s'estomper aux niveaux des vertèbres thoraciques en fonction de la masse grasseuse et musculaire pour un patient debout. Ensuite, quand le patient commence à incliner sa cage thoracique, la courbe classique, présente au niveau des vertèbres thoraciques ou lombaires, va se transformer en courbe « unique », visible sur Figure 2 (c), et cela pour tous les types de patients. Cette courbe ne présente qu'une phase décroissante et une phase croissante. Ce type de courbe peut aussi se trouver chez certains patients en position debout, quand ils présentent une faible masse musculaire et grasseuse. La courbe double est présente chez certains patients, quand les épineuses des vertèbres sont particulièrement visibles sous la peau, ce qui donne la courbe présentée sur la Figure 2 (d). Cette courbe présente cinq alternances de phases de décroissance-croissance. Ce type de courbe est particulièrement intéressant car il permet d'identifier clairement la position des épineuses.

## 2.5. Identification des types de courbes

L'algorithme de détection classique explicité dans le paragraphe précédent n'étant pas applicable à tous les types de courbes identifiés, une méthode de classification basée sur ces types a été mise en place. Une régression polynomiale est effectuée sur chacune des coupes transversales, afin de pouvoir dériver celle-ci pour visualiser les zones de croissance et de décroissance de la courbe, ce qui est visible sur la Figure 3. Une fois le type de courbe identifié, la méthodologie de détection de la colonne de base est légèrement adaptée. Pour les courbes simples, l'algorithme recherche simplement le minimum de la courbe. Pour la courbe classique rien n'est changé par rapport à l'algorithme développé précédemment : un maximum est recherché entre deux minimums. Pour les courbes double c'est un maximum qui est recherché entre les deux minimums centraux.

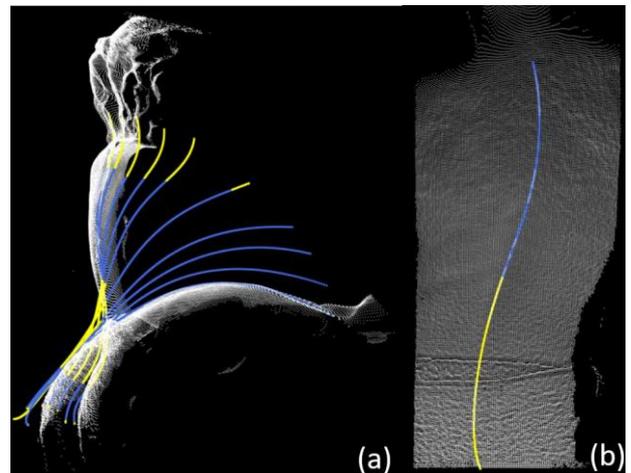


Figure 4 - Résultat du traitement de la colonne dans la plan sagittal (a), avec une position de départ debout et une position d'arrivée penchée visibles en blanc, et l'évolution de la colonne entre les deux. La cyphose est en bleu et la lordose en jaune. Le résultat du traitement dans le plan frontal (b) permet de visualiser la déviation latérale, ici sur une déviation simulée par un patient sain.

## 3. RESULTAT

Ces améliorations ont permis de suivre la colonne vertébrale sur la durée du test de flexion antérieure. Toutefois, les points identifiés sont toujours dépendants du « cadrillage » de la caméra de profondeur, et une régression polynomiale est appliquée sur les points identifiés comme appartenant à la colonne vertébrale afin de la lisser et de donner un résultat plus proche de la réalité. Cela permet également d'augmenter le nombre de points le long de la colonne en utilisant le polynôme calculé. Ces opérations sont appliquées dans le plan frontal et dans le plan sagittal.

Une fois que la courbe de la colonne vertébrale est extraite, il en résulte une suite de points qui suit les polynômes calculés à l'étape précédente. Il est ensuite possible de calculer les courbures de la colonne dans le plan frontal et sagittal. Pour cela, un triangle est créé entre trois points qui se suivent. L'angle entre les droites créées par les points  $n$  et  $n+1$  et  $n+1$  et  $n+2$  (angle  $\alpha$  de la Figure 5) permet de quantifier les angles de lordoses et de cyphoses et d'identifier le point de transition entre les

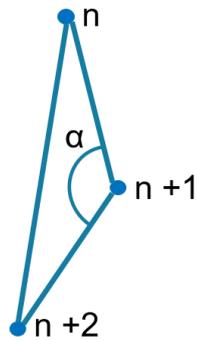


Figure 5 – ensemble de trois points utilisés pour créer un triangle pour lequel on va calculer l'angle  $\alpha$

deux. Le résultat de ce traitement est visible dans la Figure 4 (a). Il est possible de faire de même dans le plan sagittal, ce qui permet de visualiser la déviation latérale de la colonne vertébrale, comme illustré dans la Figure 4 (b). L'angle calculé dans le plan sagittal se rapproche de l'angle de Cobb, angle de référence dans le diagnostic de la scoliose. Même si il reste des imprécisions, l'angle de déviation mesuré de cette façon est fortement corrélé avec l'angle de Cobb mesuré sur une radiographie [20]. Il est ainsi possible de visualiser l'évolution de cet angle durant toute la durée du test d'Adam.

#### 4. DISCUSSION

Pour fiabiliser et créer la métrologie de cet outil, il devra idéalement être comparé à un Gold Standard, mais à ce jour, une seule technologie, le système Epionics SPINE [17], semble proposer des résultats similaires, avec toutefois des différences significatives sur les informations récupérées et la méthode de capture. Un système de capture de mouvement optoélectronique plus classique permettrait de capturer des informations dynamiques sur la colonne vertébrale [23], mais il y a des risques d'interférences entre les deux systèmes, et la pose de capteurs réfléchissants sur le patient pourrait perturber l'algorithme de détection de la colonne en modifiant les informations de surfaces. D'autres systèmes, comme la Spinal Mouse [18] permettent de capturer la forme de la colonne, mais de manière incomplète, car les captures sont statiques, quand le principal argument de la solution proposé ici est sa partie dynamique.

#### 5. CONCLUSION

L'avancement actuel de la solution présentée ici permet de capturer le mouvement de la colonne vertébrale en trois dimensions. Une prochaine étape sera de valider la fiabilité des algorithmes proposés sur une population plus larges, notamment en variant les morphologies étudiées et la présence ou non de pathologies du rachis.

Un approfondissement de ces premiers résultats pourrait permettre d'analyser en profondeur le mouvement de la colonne vertébrale, pour par exemple en quantifier la qualité. Cela pourrait permettre de suivre l'évolution d'un traitement pour une lombalgie, de

quantifier le niveau de fatigue d'un travailleur ou d'un opérateur sur poste au niveau de sa colonne vertébrale, ou encore de dépister les adolescents les plus à risques de d'être atteint d'une scoliose évolutive.

#### RÉFÉRENCES

- [1] X. Wang, Y. Fu, B. Ye, J. Babineau, Y. Ding, et A. Mihailidis, « Technology-Based Compensation Assessment and Detection of Upper Extremity Activities of Stroke Survivors: Systematic Review », *J Med Internet Res*, vol. 24, n° 6, p. e34307, juin 2022, doi: 10.2196/34307.
- [2] M. Hribernik, A. Umek, S. Tomažič, et A. Kos, « Review of Real-Time Biomechanical Feedback Systems in Sport and Rehabilitation », *Sensors*, vol. 22, n° 8, p. 3006, avr. 2022, doi: 10.3390/s22083006.
- [3] M. Giné-Garriga, M. Guerra, T. M. Manini, M. Marí-Dell'Olmo, E. Pagès, et V. B. Unnithan, « Measuring balance, lower extremity strength and gait in the elderly: Construct validation of an instrument », *Archives of Gerontology and Geriatrics*, vol. 51, n° 2, p. 199-204, sept. 2010, doi: 10.1016/j.archger.2009.10.008.
- [4] L. Marotta *et al.*, « Accelerometer-Based Identification of Fatigue in the Lower Limbs during Cyclical Physical Exercise: A Systematic Review », *Sensors*, vol. 22, n° 8, p. 3008, avr. 2022, doi: 10.3390/s22083008.
- [5] S. Poitras, P. Loisel, F. Prince, et J. Lemaire, « Disability measurement in persons with back pain: A validity study of spinal range of motion and velocity », *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 81, n° 10, p. 1394-1400, oct. 2000, doi: 10.1053/apmr.2000.9165.
- [6] V. C. H. Chan, S. M. Beaudette, K. B. Smale, K. H. E. Beange, et R. B. Graham, « A Subject-Specific Approach to Detect Fatigue-Related Changes in Spine Motion Using Wearable Sensors », *Sensors*, vol. 20, n° 9, p. 2646, mai 2020, doi: 10.3390/s20092646.
- [7] S. J. Mousavi, A. C. Lynch, B. T. Allaire, A. P. White, et D. E. Anderson, « Walking Biomechanics and Spine Loading in Patients With Symptomatic Lumbar Spinal Stenosis », *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 9, p. 751155, nov. 2021, doi: 10.3389/fbioe.2021.751155.
- [8] J. D. Auerbach, B. P. D. Wills, T. C. McIntosh, et R. A. Balderston, « Evaluation of Spinal Kinematics Following Lumbar Total Disc Replacement and Circumferential Fusion Using In Vivo Fluoroscopy », p. 10.
- [9] R. S. Kakar, Y. Li, C. N. Brown, S.-H. Kim, T. S. Oswald, et K. J. Simpson, « Spine kinematics exhibited during the stop-jump by physically active individuals with adolescent idiopathic scoliosis and spinal fusion », *SPINE JOURNAL*, vol. 18, n° 1. ELSEVIER SCIENCE INC, STE 800, 230 PARK AVE, NEW YORK, NY 10169 USA, p. 155-163, janvier 2018. doi: 10.1016/j.spinee.2017.08.221.
- [10] P. S. Sung et M. S. Park, « Lumbar spine coordination during axial trunk rotation in adolescents with and without right thoracic idiopathic scoliosis », *Human Movement Science*, vol. 73, p. 102680, oct. 2020, doi: 10.1016/j.humov.2020.102680.
- [11] I. A. F. Stokes, « Three-Dimensional Terminology of Spinal Deformity: A Report Presented to the Scoliosis Research Society by The Scoliosis Research Society Working Group on 3-D Terminology of Spinal Deformity », *Spine*, vol. 19, n° Supplement, p. 236-248, janv. 1994, doi: 10.1097/00007632-199401001-00020.
- [12] J. Dunn, N. B. Henrikson, C. C. Morrison, P. R. Blasi, M. Nguyen, et J. S. Lin, « Screening for Adolescent Idiopathic Scoliosis: Evidence Report and Systematic Review for the US Preventive Services Task Force », *JAMA*, vol. 319, n° 2, p. 173, janv. 2018, doi: 10.1001/jama.2017.11669.
- [13] D. Y. T. Fong *et al.*, « A population-based cohort study of 394,401 children followed for 10 years exhibits sustained effectiveness of scoliosis screening », *The Spine Journal*, vol. 15, n° 5, p. 825-833, mai 2015, doi: 10.1016/j.spinee.2015.01.019.
- [14] R. S. Kakar, Y. Li, C. N. Brown, T. S. Oswald, et K. J. Simpson, « Spine and Lower Extremity Kinematics Exhibited During Running by Adolescent Idiopathic Scoliosis Patients With Spinal Fusion », *SPINE DEFORMITY*, vol. 7, n° 2. SPRINGER, ONE NEW YORK PLAZA, SUITE 4600, NEW YORK, NY, UNITED STATES, p. 254-261, mars 2019. doi: 10.1016/j.jspd.2018.08.015.
- [15] M. Nishida *et al.*, « Position of the major curve influences asymmetrical trunk kinematics during gait in adolescent idiopathic scoliosis », *GAIT & POSTURE*, vol. 51. ELSEVIER

IRELAND LTD, ELSEVIER HOUSE, BROOKVALE PLAZA, EAST PARK SHANNON, CO, CLARE, 00000, IRELAND, p. 142-148, janvier 2017. doi: 10.1016/j.gaitpost.2016.10.004.

- [16] S. Schmid *et al.*, « Using Skin Markers for Spinal Curvature Quantification in Main Thoracic Adolescent Idiopathic Scoliosis: An Explorative Radiographic Study », *PLoS ONE*, vol. 10, n° 8, p. e0135689, août 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0135689.
- [17] D. Kiefer *et al.*, « Successful Evaluation of Spinal Mobility Measurements With the Epionics SPINE Device in Patients With Axial Spondyloarthritis Compared to Controls », *J Rheumatol*, p. jrheum.201470, août 2021, doi: 10.3899/jrheum.201470.
- [18] A. Livanelioglu, F. Kaya, V. Nabiyev, G. Demirkiran, et T. Firat, « The validity and reliability of "Spinal Mouse" assessment of spinal curvatures in the frontal plane in pediatric adolescent idiopathic thoraco-lumbar curves », *Eur Spine J*, vol. 25, n° 2, p. 476-482, févr. 2016, doi: 10.1007/s00586-015-3945-7.
- [19] V. Bonnet *et al.*, « Automatic estimate of back anatomical landmarks and 3D spine curve from a Kinect sensor », in *2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, Singapore, Singapore, juin 2016, p. 924-929. doi: 10.1109/BIOROB.2016.7523746.
- [20] Z. Xu *et al.*, « Back Shape Measurement and Three-Dimensional Reconstruction of Spinal Shape Using One Kinect Sensor », in *2020 IEEE 17th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*, Iowa City, IA, USA, avr. 2020, p. 1-5. doi: 10.1109/ISBI45749.2020.9098481.
- [21] O. Ciobanu, G. Ciobanu, et A. Aiello, « AN APPLICATION OF KINECT DEPTH SENSOR FOR SCOLIOSIS AND KYPHOSIS SCREENING », in *CMBEBIH 2017*, vol. 62, A. Badnjevic, Éd. Singapore: Springer Singapore, 2017, p. 713-717. doi: 10.1007/978-981-10-4166-2\_107.
- [22] B. Groisser, R. Kimmel, G. Feldman, N. Rozen, et A. Wolf, « 3D Reconstruction of Scoliotic Spines from Stereoradiography and Depth Imaging », *Ann Biomed Eng*, vol. 46, n° 8, p. 1206-1215, août 2018, doi: 10.1007/s10439-018-2033-7.
- [23] S. M. Brice, E. J. Phillips, E. L. Millett, A. Hunter, et B. Philippa, « Comparing inertial measurement units and marker-based biomechanical models during dynamic rotation of the torso », *EUROPEAN JOURNAL OF SPORT SCIENCE*, vol. 20, n° 6. TAYLOR & FRANCIS LTD, 2-4 PARK SQUARE, MILTON PARK, ABINGDON OR14 4RN, OXON, ENGLAND, p. 767-775, 2 juillet 2020. doi: 10.1080/17461391.2019.1666167.



# TELMA : plateformes pédagogiques innovantes en réseau de e-maintenance

Jennifer Mayo <sup>a</sup>, Romain Duponnois <sup>a</sup>, Camille Devos <sup>d</sup>, Guillaume Rivière <sup>e</sup>,  
Muriel Lombard <sup>a, b</sup>, François Proriot <sup>h</sup>, Olivier Cardin <sup>e, f, g</sup>, Eric Levrat <sup>c</sup>, Patrice Caulier <sup>h, i, \*</sup>

<sup>a</sup> AIP-PRIMECA/S.mart Lorraine – 745 rue du Jardin Botanique – F-54600 Villers-lès Nancy

<sup>b</sup> IUT Nancy-Brabois – Génie Mécanique et Productique – Rue du Doyen Urion – BP 90137 – F-54601 Villers-lès-Nancy

<sup>c</sup> CRAN UMR 7039 – Faculté des Sciences et Technologies – BP 239 – F-54506 Vandœuvre-lès-Nancy

<sup>d</sup> S.mart Grenoble Alpes – 46 avenue Félix Viallet – F-38000 Grenoble

<sup>e</sup> S.mart Pays de la Loire

<sup>f</sup> IUT de Nantes – Génie Mécanique et Productique – 2 avenue du Professeur Jean Rouxel – BP 539 – F-44475 Carquefou

<sup>g</sup> Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes

<sup>h</sup> Université Polytechnique Hauts-de-France – INSA Hauts-de-France

<sup>i</sup> LAMIH CNRS UMR 8201 – Campus du Mont Houy – F-59313 Valenciennes Cedex 9

\* patrice.caulier@uphf.fr

## 1. INTRODUCTION

La mise en place des programmes du BUT (Bachelor Universitaire de Technologie), la nécessité d'appréhender les technologies et pratiques de l'industrie du futur ainsi que l'expérience acquise lors de la période d'enseignement à distance imposée par la crise de la Covid 19 ont montré la nécessité d'enseigner différemment en proposant des apprentissages en mode hybride (distant et présentiel).

Dans ce contexte, le projet <ET-LIOS> (*Enseignements Technologiques de niveau Licence Ouverts pour une industrie du futur compétitive et Soutenable*), en réponse à l'appel à projet de l'ANR au titre du PIA a permis de proposer de nouvelles pratiques pédagogiques [1].

Dans cet article nous nous focalisons sur la découverte des systèmes cyberphysiques de e-maintenance basée sur les plateformes TELMA des pôles S.mart de Nancy, Nantes et Valenciennes.

Après avoir présenté les plateformes, nous précisons quelques particularités au niveau de l'architecture de pilotage et de la mise en réseau de ces plateformes à destination de la communauté éducative.

Enfin, nous présentons certaines innovations pédagogiques mises en œuvre parmi la série des 10 travaux pratiques mis à disposition.

Nous concluons sur les premiers résultats obtenus.

En résumé, la problématique posée est la suivante : « Comment mutualiser une ressource en proposant des apprentissages en mode hybride et en autorisant un accès à distance ? ».

## 2. PLATEFORMES TELMA ET PROJET ET-LIOS

Les plateformes TELMA sont issues de travaux de recherche menés au CRAN autour de la problématique de la télémaintenance [2], [3]. Elles ont été utilisées comme support à l'étude d'un système cyberphysique de e-maintenance dans le module du projet <ET-LIOS>.

### 2.1. Projet ET-LIOS

Le projet <ET-LIOS> a permis de mettre en commun les expériences acquises par les 14 établissements d'enseignement supérieur et de recherche du projet pendant la période Covid 19 en matière de pédagogie à distance et de continuité des formations afin de développer des modules pédagogiques hybrides [1] à disposition de la communauté éducative.

Dans ce contexte, la mise en réseau de trois plateformes TELMA multisites (Nancy, Nantes, Valenciennes) mutualisées permet aujourd'hui la réalisation de 10 travaux pratiques portant sur 8 thématiques. Elles sont accessibles via une connexion par VPN. Un enseignant a alors la possibilité de faire travailler ses étudiants sur une ou plusieurs des plateformes avec les ressources proposées : TP1

Découvrir et Connaitre l'installation, TP1bis Analyser les dysfonctionnements, TP2 Collecter, visualiser et traiter des données des machines en temps réel et à distance, TP2bis Définir et implémenter les stratégies de maintenance adaptées, TP3 Créer et gérer un tableau de bord, TP4 Diagnostiquer et Pronostiquer des défaillances et la performance, proposer des actions de maintenance, TP5 Gérer le support logistique des interventions, TP6 Préparer et former à l'intervention (réalité virtuelle), TP7 Superviser la production, TP8 Aider à l'intervention (réalité augmentée). Ces ressources précisent les modalités de mise en situation avec les étudiants, les compétences recherchées, les prérequis nécessaires, le travail à réaliser, les ressources mises à disposition et comment l'enseignant peut les utiliser (installation, procédures, prise en main...) et des questions de réflexion. Elles proposent également des tutoriaux sur l'installation et l'utilisation de logiciels. Certains de ces TP sont détaillés dans ce qui suit.

## 2.2. Plateformes TELMA

Les 3 plateformes TELMA permettent de supporter les enseignements de la maintenance et d'illustrer l'apport des nouvelles technologies dans le processus de maintenance et les nouvelles architectures qui en découlent. Ces plateformes simulent un process de production semi-continu, répandu dans l'industrie. Elles illustrent un process de déroulage de bande et de découpe ou poinçonnage de pièces. Les dimensions et formes de découpe peuvent être choisies parmi plusieurs options. La capacité de la bobine est également paramétrable.

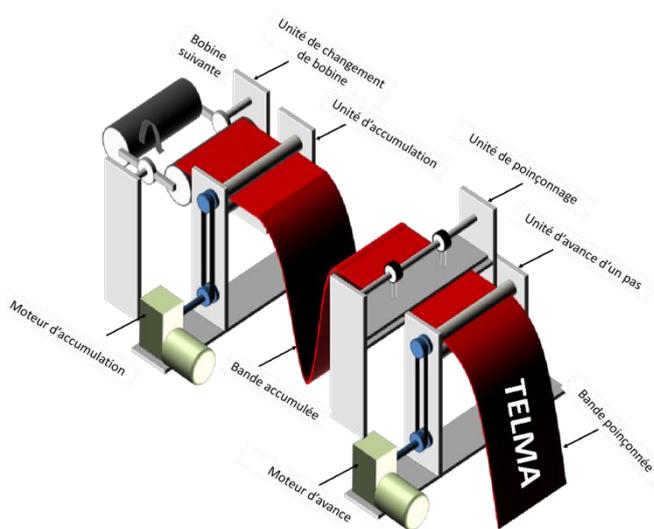


Figure 1 - Sous-systèmes fonctionnels de la plateforme TELMA

La Figure 1 présente les sous-systèmes de la plateforme TELMA de Nancy (Figure 8) :

- **Unité de changement de bobine** : permet de simuler une opération de raboutage de bobines permettant l'alimentation en entrée de la plateforme,
- **Unité d'accumulation** : permet de maîtriser la tension de la bande en créant un poumon

d'accumulation situé entre deux niveaux critiques (bande trop haute donc trop tendue / bande trop basse),

- **Unité de poinçonnage ou de découpe** : permet de simuler le process choisi. Un arbre à cames synchronisé avec le sous-système suivant simule le poinçonnage/découpe,
- **Unité d'avance** : permet d'entraîner la bande vers la sortie.

La plateforme située à Valenciennes ne comporte pas le changement de bobine. Il est remplacé par une temporisation qui dépend du produit fabriqué. Les moteurs utilisés sont des moteurs asynchrones triphasés.

Ces plateformes permettent de générer un ensemble de défaillances, définies au travers de scénarii paramétrables, qui viennent nuire au fonctionnement « normal » de l'installation. En exploitation normale ou dégradée, les données de production obtenues sont exploitées selon différents objectifs pédagogiques.

## 3. ARCHITECTURE DE PILOTAGE

### 3.1. Architecture de contrôle-commande

Le niveau contrôle-commande des plateformes TELMA est structuré en deux parties « process » et « défaut », Figure 2.



Figure 2 - Parties commande process et défaut TELMA Valenciennes

La partie commande « process » comporte un automate SE M262 de contrôle-commande de la plateforme, des modules d'E/S déportées, trois variateurs de vitesse SE ATV320 de contrôle-commande des moteurs d'accumulation, de poinçonnage et d'évacuation, et d'un maître IO-Link pour la mesure des consommations énergétiques. Pour sa part, la partie commande « défaut » comprend un automate SE M262 de génération de défaillances et de dégradations contrôlées et deux variateurs de vitesse SE ATV320 de contrôle-commande des actionneurs de défaut. L'ensemble de ces équipements est interconnecté par un réseau Ethernet TCP/IP.

Dans la suite de l'article, nous verrons que, à l'image de la pyramide CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), le niveau contrôle-commande des plateformes TELMA est enrichi d'un niveau supervision et d'un niveau MES [4].

### 3.2. Conduite de la production

La production est conduite par un opérateur, à partir d'un pupitre de commande et d'un écran tactile Harmony HMIST6 (exemple Figure 3). Le pupitre comprend différents boutons et voyants pour lancer/arrêter/visualiser la production. Via l'écran tactile, l'opérateur choisit le type de produit, la capacité de la bobine et le nombre de pièces à fabriquer (la « recette » du produit), puis il lance la production. Il peut ensuite naviguer vers différentes vues de supervision, lui donnant de manière plus ou moins détaillée l'état d'avancement de la production ainsi que l'état instantané de la machine (présence éventuelle de dégradations et défaillances durant la production). Une verrine lumineuse vient compléter ces informations.



Figure 3 - Pupitre de la plateforme TELMA Valenciennes

### 3.3. Collecte, traitement et stockage des données de production

Les plateformes TELMA sont des systèmes automatisés qui simulent une production. Les nombreux capteurs installés sur celles-ci permettent de surveiller et de contrôler le processus de production.

En plus des capteurs nécessaires au fonctionnement des plateformes, des capteurs sans fils et sans piles ont été installés sur chacune d'elle (un capteur de mesure d'intensité [5] et 2 capteurs de température [6]). Ces solutions de captage de donnée, non intrusives et faciles d'installation, communiquent avec une passerelle en 2,4GHz.

Les données, qu'elles viennent de la passerelle sans fil ou des entrées sorties déportées sont renvoyées par l'Automate Programmable Industriel (API) de commande. Cet API possède un serveur OPC intégré sur lequel les données peuvent être lues et écrites. Un serveur OPC UA externe récupère également les données présentes dans les tables du serveur de l'API.

Les données ainsi générées sont transformées et mises en forme par une chaîne de traitement sur l'outil de développement Node-RED [7]. Cet outil basé sur les flux permet, par le biais d'un client OPC, de venir lire dans la table des variables du serveur OPC interne à l'API et de les transformer et mettre en forme pour être utilisées dans le calcul d'indicateur ou pour leur stockage dans une base de données.

Les données de production sélectionnées et mises en forme sont stockées en format .json dans une ou plusieurs des bases MongoDB [8] se trouvant sur un des sites (Nancy, Nantes ou Valenciennes). Elles peuvent être exportées dans des fichiers .csv.

### 3.4. Architecture réseau

Les plateformes TELMA peuvent être utilisées localement dans un contexte pédagogique classique de travaux pratiques et de projets sur site mais également en mode distant par Internet pour des opérations de télésurveillance de télédiagnostic, de télémaintenance d'une installation industrielle distante, ou pour l'accès à des données de production, de suivi de production, ainsi que pour l'enseignement à distance. Cela nécessite la mise en place d'une architecture réseau décrite Figure 4.

L'écran tactile, les variateurs de vitesse ATV320, le maître IO-Link SMC, l'automate de commande M262 et le deuxième automate chargé de la génération de défaillances communiquent entre eux par Ethernet IP.

L'automate M262 et l'écran tactile HMI de Schneider Electric sont équipés de deux cartes Ethernet IP, la première est connectée dans le réseau interne de la machine, tandis que la deuxième est connectée dans le réseau Ethernet du pôle AIP. D'autre part, ils sont équipés de serveurs web. De cette manière, les données de l'automate et l'interface web de l'IHM sont accessibles depuis les salles de TP pour un pilotage et une surveillance à distance.

De plus, en utilisant un VPN, il est possible de piloter la machine depuis l'extérieur, récupérer les données du serveur OPC UA embarqué de l'automate de commande, et visualiser le fonctionnement de la machine grâce aux caméras web.

A ce jour, nous avons uniquement une interconnexion entre nos 3 machines via ce VPN, ce qui réduit les risques de cyber attaques. Nous travaillons actuellement sur la sécurisation de l'accès via d'autres sites universitaires.



COOX<sup>®</sup> (éditeur ORDINAL Software) [11] et, côté automate, à l'aide de l'environnement de développement *Exostruxure™ Machine Expert*<sup>®</sup> (EME, éditeur Schneider Electric). Pour sa part, la mise en œuvre des échanges a nécessité la configuration et l'utilisation d'un serveur OPC Top Server 6 entre l'application de MES et l'automate « process ».

### 4.3. Application de supervision

L'objectif de ce TP est de familiariser les étudiants avec la création d'une application simple de supervision, étendant les simples données issues des capteurs présents sur TELMA. Les étudiants ont à disposition un accès à l'interface web permettant de visualiser l'état de la machine, ainsi que de lancer des ordres de fabrication à distance. Les sujets proposés font travailler au choix avec InTouch<sup>®</sup> ou PcVue<sup>®</sup>.

En parallèle, un *template* de programmation leur est fourni sur le logiciel AVEVA<sup>®</sup>, contenant une bibliothèque préconfigurée d'éléments graphiques prêts à être animés. Dans le sujet, les éléments nécessaires à la connexion de leur application avec le serveur OPC de TELMA leur sont également fournis.

Les objectifs opérationnels des étudiants se déclinent en quatre temps :

1. Animer des objets sur le changement de valeur d'une variable booléenne (ex : vérin sorti/rentré)
2. Animer des objets sur des variables entières (ex : hauteur de bande en stock)
3. Tracer des graphiques de suivi d'une valeur de variable en temps réel (ex : vitesse du moteur triphasé)
4. Historiser des déclenchements d'alarme sur une valeur de stock critique, avant sa détection par les capteurs d'arrêt d'urgence

### 4.4. Exploitation d'indicateurs en maintenance

Avec les données générées par les plateformes différents indicateurs peuvent être définis par les étudiants. Ces indicateurs peuvent permettre de surveiller la production de la plateforme, comme présenté dans la Figure 7.



Figure 7 - Interface Web du tableau de bord de surveillance des plateformes TELMA

Ces indicateurs peuvent également être définis pour surveiller l'état de santé des équipements. Pour ces derniers, les étudiants se basent sur les analyses dysfonctionnelles qu'ils ont réalisées sur les plateformes ainsi que sur les documentations fournies par les constructeurs.

Les étudiants peuvent, à partir des indicateurs qu'ils ont défini, créer des tableaux de bord directement sur l'outil de développement *Node-RED*.

La mise en place de ces indicateurs permet aux étudiants de mettre en place concrètement les stratégies de maintenance préventive conditionnelle, voire prévisionnelle, définies en TD. Les étudiants peuvent également s'essayer au développement de solutions d'analyse et de diagnostic automatiques des défaillances d'une plateforme.

### 4.5. Réalité virtuelle

Une fois le(s) problème(s) identifié(s) sur la plateforme, les étudiants n'ont pas la possibilité d'aller jusqu'à l'intervention physique pour procéder aux opérations de maintenance nécessaires pour sa remise en état. Aussi, une application de réalité virtuelle a été développée sous *SimLab Composer* leur permettant d'aller jusqu'au bout de l'« intervention virtuelle ». Dans notre cas, c'est le remplacement du roulement à billes de l'arbre de l'unité d'accumulation qui a été développé.

Cette application peut également servir pour la formation des personnels hors site en prévision d'une intervention sur site industriel ou pour la préparation des pièces de rechanges, équipements et outils nécessaires pour réaliser les différentes opérations.

Elle permet également de travailler les problématiques de mise en position, d'isostatisme, de réglage, de contrôle ... à respecter avant et après un démontage/remontage. Elle peut être utilisée couplée à de la captation de mouvement afin de travailler sur l'accessibilité, l'ergonomie et la posturologie lors d'une intervention et ainsi définir les équipements adéquats.

### 4.6. Réalité augmentée

Une fois les étudiants formés aux interventions, ils peuvent intervenir physiquement sur la plateforme. Pour cela, ils sont guidés grâce à des applications de réalité augmentée développée avec *Ecostruxure™ Augmented Operator Advisor (AOA)* de Schneider Electric. A titre d'exemple, une procédure de consignation a été développée. Elle a pour but de guider l'utilisateur lors de la mise hors tension de la machine, en listant les étapes à suivre, depuis la sélection des EPI (Equipements de protection individuel) jusqu'à la VAT (vérification d'absence de tension).

En pratique, les étudiants peuvent créer une application pour une intervention particulière. Ils apprendront entre autres à organiser la documentation en choisissant les informations pertinentes à mettre à disposition en temps réel, quand l'opérateur en a besoin pour son travail, par la superposition de données ou

d'objets virtuels sur la plateforme réelle. Son travail sera organisé selon un mode opératoire modélisé sous forme d'un logigramme. Le passage d'une étape à une autre se fera par acquittement de l'opérateur, il peut se guider soit par comparaison d'image soit en fonction de l'état d'une variable lue dans l'automate. Le serveur hébergeant l'application de RA est installé dans le réseau Ethernet du pôle AIP, il communique avec l'automate de commande de TELMA afin de récupérer les données en temps réel et les afficher avec l'application AOA.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce rétrofit de nos plateformes a permis en 2 ans de faire un bond technologique dans nos Travaux Pratiques. 10 sujets de TP ont ainsi été écrits pour le niveau licence, mais peuvent s'adapter à des niveaux supérieurs. Ils sont consultables sur le site du projet ET-LIOS [12].

Les premiers retours des collègues et des étudiants sont très encourageants. Après chaque série de Travaux Pratiques, nous avons ainsi soumis un questionnaire à nos étudiants. Ce questionnaire a montré un haut niveau de satisfaction ainsi qu'une sensibilité particulière aux nouvelles technologies mises en œuvre. Les résultats obtenus lors des travaux pratiques nous montrent que nous atteignons bien les objectifs pédagogiques fixés. Nous voyons maintenant des collègues s'intéresser de très près à ces plateformes TELMA et nous attendons prochainement des TP à distance sur une ou plusieurs plateformes simultanément.

En plus d'être un traditionnel support pour les enseignements de maintenance, TELMA devient un support pour analyser des données de production, développer une supervision, appréhender des problématiques réseau, ...

Enfin, l'utilisation de la réalité augmentée ou la réalité virtuelle est un plus pour appréhender d'autres thématiques connexes comme l'ergonomie en situation d'intervention sur machine.

## REMERCIEMENTS

Le projet <ET-LIOS> a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Programme d'Investissements d'Avenir *Hybridation des formations d'enseignement supérieur de niveau licence*, portant la référence ANR-20-NCUN-0009.

## REFERENCES

- [1] Projet <ET-LIOS> (*Enseignements Technologiques de niveau Licence Ouverts pour une industrie du futur compétitive et Soutenable*) 01/11/2022 au 30/10/2022. <https://et-lios.s-mart.fr>
- [2] Levrat E., Salzemann B, Clanché F. TELMA Plate-forme d'intégration de télémaintenance pour l'enseignement et la recherche. CETSIS'2005 Nancy, 25-27 octobre 2005
- [3] Muller A. Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic - Thèse de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1,

spécialité Automatique, traitement du signal et Génie informatique. 7 juin 2005.

- [4] Caulier P. et Békarr A. Pilotage adaptatif et durable d'une cellule de production de biens « intelligents », Actes du 15<sup>ème</sup> Colloque National AIP-PRIMECA, La Plagne, France, 12-14 avril 2017.
- [5] <https://www.se.com/fr/fr/product/A9MEM1571/powertag-capteur-de-mesure-radiofr%C3%A9quence-dt40-3p+n-63a-amont/?node=44005611021-energy-sensors&range=64482-acti9-powertag-link&selected-node-id=44005611021>
- [6] <https://www.se.com/fr/fr/product/A9XST114/powertag-lot-de-4-sondes-de-temp%C3%A9rature/>
- [7] <https://nodered.org/>
- [8] <https://www.mongodb.com/fr-fr>
- [9] <https://www.isa.org/>
- [10] Caulier P. Gestion de l'exécution de phases de production par interface PLI, Actes du 13<sup>ème</sup> Colloque sur la Modélisation des Systèmes Réactifs (MSR 2021), Paris, France, 8-9 novembre 2021.
- [11] <https://www.ordinal.fr/>
- [12] [E-maintenance des systèmes cyber-physiques de production - <ET-LIOS> \(s-mart.fr\)](#)

## ANNEXE



Figure 8 – Plateforme TELMA de Nancy

# MÉMOTVIT' : L'apprentissage d'un champ lexical métier par les cartes : retours d'expériences

F. Viprey<sup>ab\*</sup>, R. Geoffroy<sup>bc</sup>, E. Trujillo<sup>c</sup>, C. Chevignard<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Arts et Métiers Science et Technologie, LABOMAP, UBFC, HESAM Université, F-71250, Cluny, France

<sup>b</sup> Arts et Métiers Science et Technologie, ICIFTech, F-75013, Paris, France

<sup>c</sup> Arts et Métiers Science et Technologie, UBFC, HESAM Université, F-71250, Cluny, France

\* e-mail : fabien.viprey@ensam.eu

MEMOTVIT', un jeu de cartes comportant des définitions, permettant à des apprenants d'acquérir des connaissances sur des champs lexicaux inhérents à une discipline, et ce par le biais d'une activité ludique, en équipe. C'est un jeu qui sollicite l'intelligence individuelle et collective ainsi que les sens.

L'objectif est de fournir à l'apprenant la capacité à connaître un champ lexical par contextualisation en équipe, puis une décontextualisation individuelle et enfin une recontextualisation en équipe.

L'apprenant peut évaluer son niveau de connaissance en s'autoévaluant grâce à une évaluation formative seul ou en groupe, un questionnaire en ligne.

*L'équipe fondatrice*

## INTRODUCTION

La pédagogie par le jeu est une pratique favorable à l'apprentissage des adultes, enfants et étudiants. Cette pratique pédagogique stimule la créativité et la spontanéité de l'apprenant afin d'encourager son développement holistique [1]. Le recours au « serious games » ou jeux sérieux sont des outils pédagogiques des plus pertinents tout en étant en parfaite cohérence avec les pédagogies actives actuelles [2] [3]. La conception d'un jeu sérieux, sa fabrication, sa mise en place et son inclusion dans une séquence pédagogique est un défi à relever [4]. Dans ce contexte, certains auteurs mettent à disposition des fondements ainsi que des exemples pratiques et des comparaisons avec les jeux de société ou jeux vidéo [5] [6] [7].

L'utilisation de support aux jeux tels que des plateaux ou des systèmes physiques permet aux joueurs (i.e. apprenants) une immersion, un contexte et environnement d'apprentissage inclusif ; autrement-dit, l'apprenant est acteur de sa formation. Des sociétés telles que [CIPE](#) (Centre International de la Pédagogie d'Entreprise) [8] fournissent depuis les années 80 des

moyens d'apprentissage par le jeu via des plateaux, cartes, jetons et diverses pièces tels que *RÉACTIK*, le jeu des *Gentils-flux*, ou le jeu *KANBAN*. Les jeux du CIPE sont utilisés en apprentissage thématique de la stratégie, la qualité, l'organisation du travail, la planification, la sécurité au travail ou la gestion de projet pour les entreprises. D'un point de vue académique ces jeux peuvent être également être utilisés tout comme des jeux créés par des enseignants chercheurs tels que Delta Design [9].

Les établissements d'enseignement supérieur sont également des lieux où la création de jeux sérieux s'est développée. Par exemple, [GopenDoRe](#) créé par l'équipe DoRANum [10], est un jeu de cartes coopératif pour l'acquisition de bonnes pratiques en gestion de partage de données. Sur la même thématique, le jeu FAIR-Play développé par le CIRAD de Montpellier est basé sur des cartes et un plateau [11]. Le SCD de l'université de Guyane a mis au point un jeu de plateau [Jeu Fastoche](#) permettant l'appréhension du fonctionnement de l'archive ouverte HAL [12]. L'ENSAM a développé plusieurs jeux pédagogiques tels que gAMustry 4.0 qui est jeu de plateau pour l'acculturation aux technologies 4.0. Ce jeu a été développé par L. Roucoules et l'équipe du campus de Aix-en-Provence. G. Grampeix a développé dans le cadre de projets étudiants en 2<sup>ème</sup> année le jeu SimCitiesDurable. Ce jeu de plateau a pour objectif de rendre une ville durable d'un point de vue environnemental. Par ailleurs, les auteurs ont travaillé conjointement au développement du jeu de cartes Mémotvit' et son inclusion dans la maquette pédagogique de formation d'ingénieur Arts et Métiers sur le campus de Cluny.

Ainsi, l'article traite de la genèse de MEMOTVIT', de sa conception, de son déploiement dans une séquence pédagogique, de son évaluation ainsi que de sa valorisation et dissémination.

## 1. ORIGINE DE LA DEMARCHE ET DEFINITION DU JEU

Le dispositif d'apprentissage MEMOTVIT' a été initié par une expérience vécue lors de la visite du service SAPIENS de l'USPC [13] par les auteurs en 2017. L'objectif de l'expérience était la découverte d'intégrer le jeu dans certaines activités d'apprentissage. Notamment, le recours à des cartes au service de l'acquisition d'un champ lexical thématique inhérent aux disciplines ou métiers a permis l'émergence de MEMOTVIT' au sein du campus Arts et Métiers de Cluny.

Les auteurs, pour certains, ayant une expérience dans la discipline de métrologie (i.e. science de la mesure) ont vu une belle opportunité de proposer un jeu de cartes (un mot + une définition + un lien vers le Vocabulaire International de Métrologie (VIM) en ligne [14]) pour faire acquérir aux élèves ingénieurs des Arts et Métiers de Cluny le vocabulaire métier spécifié par le VIM. Ce vocabulaire proposé par le Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM) permet des échanges en métrologie basés sur un langage international univoque. L'objectif initial et maintenu à ce jour n'est de ne pas faire apprendre par cœur un ensemble de définition hors d'un contexte et sans raison. L'activité de jeu via MEMOTVIT' a été réfléchi et incluse dans une séquence pédagogique.

L'activité d'acquisition de vocabulaire n'est pas propre au secteur de la métrologie, mais inhérente à toute discipline quelle qu'elle soit pour permettre une communication claire et univoque. Il est ainsi essentiel de connaître le vocabulaire de bases d'une discipline. L'élève en formation aux Arts et Métiers doit avoir les prérequis en terme de vocabulaires métiers, sans pour autant être un professionnel du secteur. Ainsi cette activité peut aisément être transférée à d'autres disciplines au sein des Arts et Métiers ou d'autres établissements d'enseignements supérieurs.

## 2. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE ET DIMENSIONS NUMERIQUES, SPATIALES ET ORGANISATIONNELLES

Le jeu comprend une règle du jeu et 76 cartes : 70 définitions et 6 cartes blanches permettant d'apposer un mot et définition au gré de ses envies ou pour faire apprendre un mot de vocabulaire ne figurant pas dans la liste initialement établie. Ces cartes sont contenues dans un étui en bois réalisé en interne par les auteurs [15] tout comme le graphisme [16] comme le montre la Figure 1.



Figure 1 : Illustration du jeu complet MEMOTVIT' (76 cartes et règle du jeu à gauche et exemple d'une carte à droite).

La règle du jeu autorise deux contextes : un premier en séquence pédagogique encadrée par un enseignant, et un second d'auto-formation de l'apprenant. En séance d'enseignement à l'ENSAM, l'activité nécessite une salle informatique avec accès au VIM, et à la plateforme d'e-learning Moodle nommé SAVOIR à l'ENSAM, un jeu de cartes (76 cartes, une règle), un chronomètre, un tableau, un questionnaire d'évaluation distribué à chaque étudiant.

L'activité s'inscrit dans une unité d'enseignement de métrologie comprenant une approche inductive :

- 2hs de travaux dirigés avec une mise en situation des étudiants sur des problématiques de mesure.
- S'en suit, 2 x 2 hs de CM par accompagnement où l'étudiant est au centre (i.e. est acteur) de sa formation. En effet, il a accès à un certain nombre de ressources (e.g. support de cours, ouvrages articles, résultats de travaux, vidéos, etc.) sur la plateforme d'e-learning Moodle de l'ENSAM Cluny. Il peut interagir avec l'enseignant par des questions ou lors des interventions de l'enseignant. Les acquis d'apprentissage visés sont la compréhension et la mémorisation des notions de métrologie, son histoire, les outils mathématiques et la mise en place d'une activité de mesure à partir de la définition du mesurande jusqu'au calcul d'incertitude de mesure.
- Examen de milieu de séquence pédagogique ;
- 2 x 4hs de travaux pratiques où l'étudiant est mis en situation devant des problématiques techniques et industrielles de métrologie pour lesquelles ils doivent proposer des solutions et les mettre en place ;
- Examen de fin de séquence pédagogique.

Durant la dernière heure de CM, le jeu est proposé aux élèves. L'élève découvre une activité hors du cadre dont il est familier (i.e. pédagogie déductive ou inductive).

L'activité dure 40 min pour un groupe de 24 étudiants. Une première partie de contextualisation en groupe où l'enseignant choisi certaines cartes en fonction des connaissances que doivent acquérir les étudiants. Il lit ensuite les cartes : le mot présenté ainsi que sa définition. Il explique les concepts associés en s'appuyant sur des rappels du cours. Ensuite deux équipes de 12 sont formées pour réaliser l'activité. C'est la partie de décontextualisation. L'étudiant est libre de ses choix. Les idées et la façon de faire deviner le mot durant les trois manches (i.e. parole, puis un mot et enfin le mime) par un étudiant au reste du groupe sont notés au tableau par l'enseignant ainsi que les points acquis par les deux équipes. Ensuite à la fin de l'activité, la recontextualisation faite par l'enseignant avec la participation des étudiants permet de revenir sur les idées et méthodes déployées par ces derniers pour faire deviner un mot de vocabulaire. Finalement une synthèse sur les définitions trouvées est faite par l'enseignant. Les apprenants sont invités à se positionner via un questionnaire formatif d'appariement sur la plateforme d'e-learning. Ce questionnaire peut être réitéré sans



## 6.2. Dimension stratégique du projet (stratégie d'implication et de soutien aux étudiants)

L'activité MEMOTVIT' place l'étudiants seul ou en groupe en fonction de l'étape du jeu, au cœur de sa formation. Le jeu lui permet ainsi d'être acteur et d'être pleinement impliqué dans l'acquisition de connaissances d'un champ lexical spécifique à une discipline. Cette formation est évaluée d'un point de vue formatif à la fin de la séquence pédagogique. L'étudiant, avec accès au VIM [14], et par un questionnaire formatif, peut progresser dans des conditions saines et détendue. Le test donne lieu à une évaluation chiffrée mais qui ne sera pas comptabilisée dans le dossier de l'étudiant. La note joue uniquement le rôle de curseur pour permettre à l'étudiant de situer son niveau d'apprentissage.

## 6.3. Evaluation ou auto-évaluation formative

L'évaluation formative permet à l'apprenant de prendre conscience de ses difficultés, de ses erreurs, de ses hésitations, de ses dépassements, de ses progrès. L'évaluation formative donne de l'autonomie en stimulant la prise de conscience. Elle redonne la confiance et l'intérêt dans l'apprentissage en éliminant le stress de la mauvaise note, et permet à l'élève de ne pas finir l'année avec une très mauvaise opinion par la matière qu'on lui enseigne et de lui-même. Cette approche contribue à installer un climat de confiance et des interactions plus riches, plus positives, et à terme, plus efficaces entre étudiants et enseignants.

L'étudiant reçoit un retour individualisé de son questionnaire (i.e. feed-back) favorisant son apprentissage et le rendant acteur. Les responsabilités classiques de l'enseignant (évaluation, régulation) sont maintenant partagées avec l'apprenant (autoévaluation, autogestion des erreurs, autorégulation), ce qui augmente considérablement l'efficacité de la pédagogie.

Le questionnaire formatif d'appariement sur Moodle proposé en séance est partiellement illustrée à la Figure 4. Il peut être rempli n'importe quand dans la séquence et sans contraintes de temps.

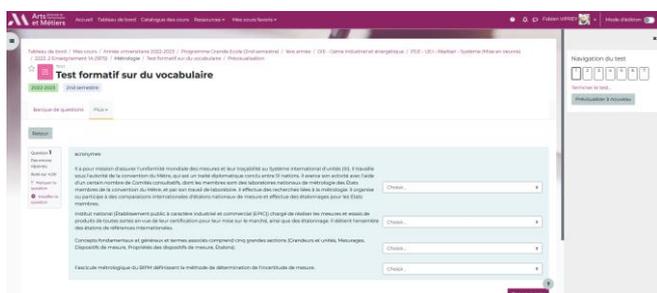


Figure 4 : Illustration du questionnaire en ligne sur SAVOIR : questionnaire d'évaluation formative.

La Figure 5 Figure 5, quant à elle, présente les résultats de 87 participants dont seulement 49 ont choisi de terminer le test. Le questionnaire permet de récupérer les informations suivantes : Prénom et nom de l'apprenant inscrit au cours et ayant débuté le questionnaire, son adresse électronique, l'état d'avancement du questionnaire, la date à laquelle la réponse au

questionnaire a débuté, la date de fin et ainsi le temps passé pour le compléter, le taux de réussite de chaque onglet thématique (Figure 4.), une note par étudiant, une moyenne et dispersion de l'activité, une moyenne et dispersion pour chaque onglet thématique. Il est également possible de récupérer la tendance et la progression de chaque étudiant dans la complétude du questionnaire. Chaque étudiant connaît son taux de réussite et son état de progression en temps réel. En revanche ni le résultat sur une promotion ni le positionnement de l'étudiant par rapport au reste de la promotion sont dévoilés. L'étudiant peut également réitérer le questionnaire autant de fois qu'il le souhaite durant la phase de révision de l'UE.

Dans un avenir proche, le questionnaire sera disponible sur la plateforme Woodlap (application d'interaction en classe) et ainsi il pourra être mené directement en salle avec une participation en temps réel des étudiants via l'utilisation de leur téléphone portable.

## 7. FINALITE DE LA DEMARCHE

La finalité de la démarche de pédagogie par le jeu via l'outil MEMOTVIT' entraîne l'étudiant à utiliser des termes usuels associés à la thématique, discipline ou métiers associés au jeu (ici dans cette version « la métrologie »). Pour cela, il doit :

- Maîtriser l'orthographe des mots,
- Maîtriser le sens de la définition,
- Être capable de restituer et utiliser le mot dans un contexte particulier.

### 7.1. Types de capacités et acquis d'apprentissages concernés/visés

Les capacités et acquis d'apprentissages concernés sont les suivants :

- Communiquer dans une logique professionnelle,
- S'inscrire dans une dynamique professionnelle,
- S'entraîner aux situations professionnelles avec un vocable adapté,
- Mieux se connaître et se projeter selon les exigences et contraintes professionnelles,
- Identifier / reconnaître les différences lexicales afin d'éviter les malentendus, et de commettre des impairs dans une discipline ou un métier,
- Adapter son comportement et son langage à un interlocuteur francophone ou anglophone et cela en fonction de la discipline dans laquelle il y a des échanges,
- Évoluer et travailler en équipe. En effet, l'étudiant doit se mobiliser rapidement et en équipe afin d'apprendre.

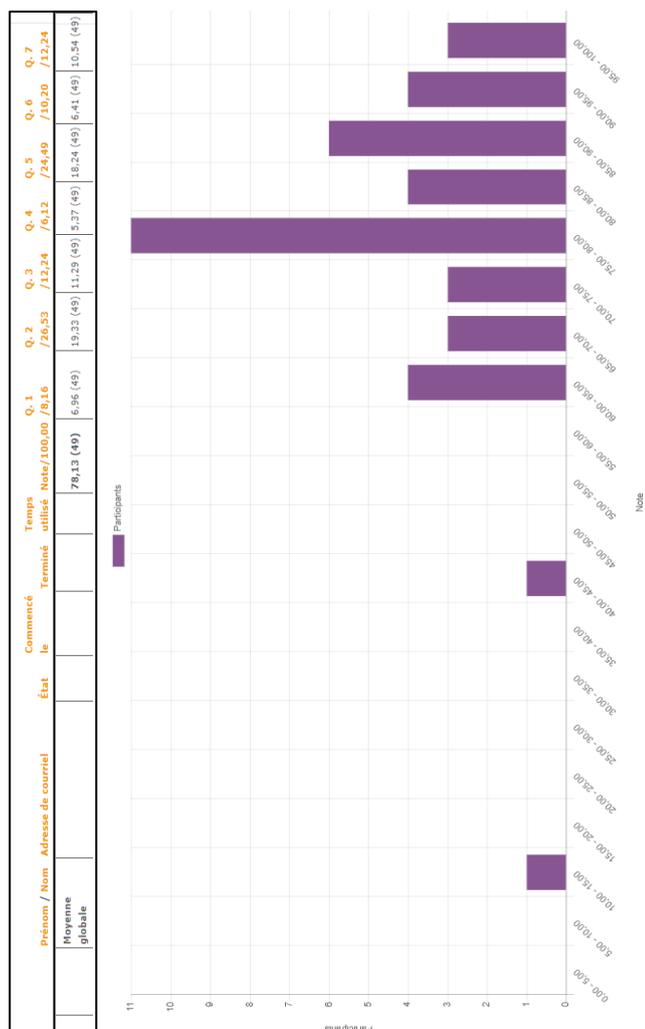


Figure 5 : Résultat d'évaluation formative sur 87 participants dont seulement 49 l'ont terminée : En orange, information concernant chaque apprenant ; en noir, moyenne globale par questions ; enfin histogramme de répartition des participants.

## 7.2. Variantes du jeu

Plusieurs variantes du jeu sont possibles et disponibles. La première est l'insertion de 6 cartes vierges. Pour adapter le jeu à ses exigences, avant le début de la partie, l'animateur ou les joueurs peuvent insérer à leur guise des expressions (et éventuellement les définitions associées) sur des cartes blanches plastifiées fournies.

La seconde permet à l'enseignant ou l'animateur de décider en début de partie que les joueurs peuvent écarter une carte lors de leur tour, le joueur est alors pénalisé. La pénalité consiste à ce que son équipe lui fasse deviner le mot suivant.

Une dernière variante est la pose de carte sur un bandeau (Figure 6) permettant à la carte d'être visible des participants mais pas du porteur. Ainsi ce dernier doit deviner sa carte en fonction des dires, faits et gestes d'un autre participant.

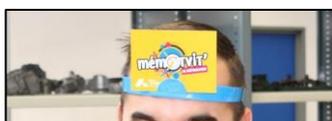


Figure 6 : Illustration d'une variante proposée du jeu MEMOTVIT'.

## 7.3. Rôle du formateur

Le formateur, animateur et/ou enseignant a un rôle majeur dans l'activité. Tout d'abord il a un rôle d'arbitrage des deux équipes et du bon respect des règles sous peine de point ou temps de pénalité.

Son rôle principal, de par sa maîtrise du vocabulaire présent dans le jeu, doit pouvoir aiguiller les apprenants s'il y a vraiment des difficultés. Une explication précise des mots et définition est donnée avant le jeu en s'appuyant sur des cas pratiques, industriels ou de laboratoires afin de contextualiser le mot de vocabulaire.

Il a pour rôle de comptabiliser les points et les méthodes employées par les étudiants (mots, mimes et gestuelles employés). À la fin de l'activité, l'enseignant recontextualise avec la participation des étudiants, ce qui permet de revenir sur les idées et méthodes déployées pour faire deviner un mot, avant de réaliser une synthèse sur les définitions rencontrées.

## 7.4. Evaluation du projet MEMOTVIT' : mesure des effets et possibles évolutions

Le jeu est suivi d'un questionnaire d'évaluation de l'activité par les étudiants ayant participé. Ce questionnaire a pour objectif d'avoir un retour rapide des étudiants, et des commentaires ayant permis des améliorations du jeu à ses débuts et permet désormais d'ajuster la séquence de jeu en pédagogie.

L'objectif de ce questionnaire est d'obtenir des informations en peu de temps et pour un grand nombre d'étudiants. Ainsi il reste sous un format manuscrit pour rester efficace. À l'avenir, ce questionnaire sera informatisé pour faciliter son traitement ainsi que la minimisation de papier consommé (3 sondages par feuille, format DL selon l'ISO 269 soit 9,9 x 21 cm). Cette informatisation risque de voir le nombre de participation à cette évaluation baisser car cela laisserait l'étudiant libre de le remplir ou non.

Par ailleurs de nombreux échanges avec des étudiants et des enseignants ont permis de mettre au point la pratique de cette activité et une meilleure pratique plus efficace et rapide tant sur sa mise en place que sur la mémorisation des mots et leur définition.

En Figure 7 est présenté les résultats du sondage auprès d'une demi-promotion sur un semestre. Il est possible d'observer par la tendance que l'activité est très bien perçue par les étudiants. Cependant, les étudiants restent peu convaincus que l'activité peut être faite hors des séances pédagogiques malgré qu'une version est disponible en bibliothèque (sur place ou en emprunt) et que certains étudiants l'utilisent hors séance. De plus, cela ne permet pas forcément de désacraliser la discipline qui reste difficile à comprendre et à maîtriser. En effet, elle nécessite une exigence et une exactitude sur le fond scientifique, verbal et de mise en œuvre ; elle qui reste parfois contraignante pour les apprenants.

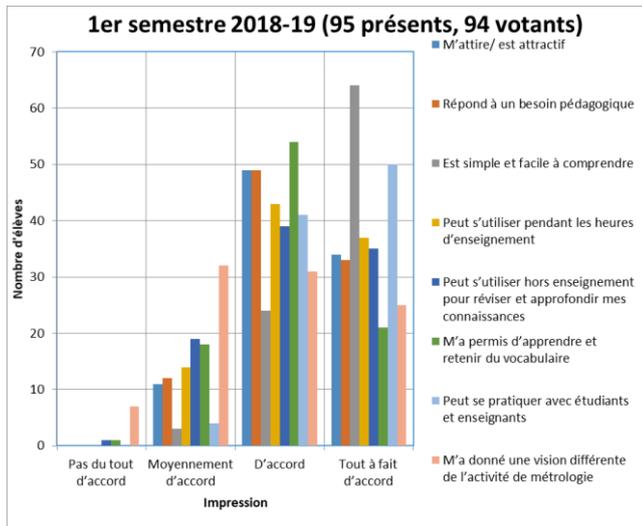


Figure 7 : Résultats du questionnaire d'évaluation de l'activité MEMOTVIT' par les étudiants de 1ère année PGE durant le 1er semestre de l'année universitaire 2018-2019.

## 7.5. Perspectives de transférabilité de la démarche

Le jeu est mis en place dans la maquette pédagogique et est fonctionnel depuis l'année universitaire 2018. Une démarche de dissémination est en cours auprès des bibliothèques ENSAM.

De plus, un rapprochement est en cours avec l'IUT de Clermont-Ferrand, l'IUT de Toulon ainsi que INP Grenoble.

En ce qui concerne une diffusion plus large (i.e. ESR, industrie, etc), le jeu a suscité de l'intérêt auprès de la société Michelin pour de la formation en interne. Un rapprochement avec la société Ikigai - Games [19] pourrait également permettre une diffusion numérique de ce jeu. A des fins de protection, conjointement avec le service juridique de l'ENSAM, et un dépôt de marque et de logo a été établi en juillet 2022 auprès de l'INPI [20].

L'ICIFTech, a également décliné le jeu avec une version d'acquisition de champ lexical de « La pédagogie » plutôt que « La Métrologie » pour former les nouveaux enseignants de l'ENSAM durant leur séminaires d'accueil.

Une candidature en 2019 au prix PEPS [21] a été soumise.

## 8. CONCLUSION

Ce papier dresse un bilan, et retours d'expériences d'inclusion du jeu en pédagogie. Une synthèse sur la genèse du jeu MEMOTVIT', sa conception est menée. La description de l'inclusion du jeu dans une séquence pédagogique inductive est illustrée et l'évaluation formative des étudiants permettant une amélioration continue de l'activité depuis 2018 en est faite. Une perspective au projet MEMOTVIT' est sa dissémination auprès d'établissement d'enseignement, ainsi que dans des entreprises industrielles et sa conversion numérique.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les différents services supports de l'ENSAM qui ont permis l'émergence de MEMOTVIT', sa mise en place ainsi que de la valorisation de l'outil pédagogique. Un remerciement spécial à l'ICIFTech pour son support. Les derniers remerciements vont aux étudiants à compter de la promotion entrante en 2017 qui ont apporté leur retours d'expériences lors du bêta-test de ce jeu, et qui l'ont utilisé dans la séquence pédagogique de métrologie ou hors contexte.

## RÉFÉRENCES

- [1] F. Carnovalini, A. Rodà and P. Caneva, "A rhythm-aware serious game for social interaction," *Multimedia Tools and Applications: An International Journal*, pp. 1-23, 2022.
- [2] Y. Kasbi, *Les serious games : une révolution*, vol. 1, Liège: Edipro, 2012, p. 302.
- [3] C. A. Clark, *Serious Games*, U. P. o. America, Ed., 1987, p. 176.
- [4] V. Lavergne Boudier and Y. Dambach, *Serious game : Révolution pédagogique*, Hermes Science Publications, 2010.
- [5] J. Alvarez, *Du jeu vidéo au serious game : approches culturelle, pragmatique et formelle*, U. d. Bordeaux, Ed., Toulouse 2: Thèse de doctorat, 2007.
- [6] R. Dörner, S. Göbel, W. Effelsberg and J. Wiemeyer, *Serious Games: Foundations, Concepts and Practice*, Springer Cham, 2016, p. 421.
- [7] D. Thalmann, F. Laamarti, M. Eid and A. El Saddik, "An Overview of Serious Games," *International Journal of Computer Games Technology*, p. 11, 2014.
- [8] CIPE, "Centre International de la Pédagogie d'Entreprise (CIPE)" (accès 2022).
- [9] L. L. Bucciarelli, "Delta Design: Seeing/Seeing as," *Proceedings 4th Design Thinking Research Symposium on Design Representation*, April, 1999.
- [10] V. Gadrat, Y. Lafosse, C. Sowinski and C. Wyszczynski, "Jeu [GopenDoRe](#) : le jeu coopératif pour acquérir des bonnes pratiques de gestion et de partage des données de la recherche," 2019. (Accès 2022).
- [11] C. Boussou, M.-C. Deboin, L. Dedieu, S. Auzoux, F. De Lamotte, C. Barthelemy and G. Doux, "Libérez la science, un jeu FAIR-play, série Gestion des données," p. 40, 2022.
- [12] M. Latour, C. Boiteux and J. Le Bruchec, "[Jeu Fastoche HAL](#)" 2018. (Accès 2022).
- [13] S. -. CRI, "[SAPIENS](#) - Alliance Sorbonne Paris Cité" (Accès 2022)
- [14] BIPM JCGM200, *Vocabulaire International de Métrologie légale (VIM) – Bureau International, 3ème édition ed., JCGM, 2012.*
- [15] Arts et Métiers, "[Fablab Chunois](#)" (Accès 2022)
- [16] E. Trujillo, "[EMTrujillo My Portfolio - Memotvit](#)" (Accès 2022)
- [17] ICIFTech - [ACCENS](#), "Institut de Conseil et d'Innovation en Formations Technologiques" (Accès 2022)
- [18] A. Kazakevičius, M. Renault, N. Mourid and P. Beslay, "Le Futur De L'Enseignement Et De L'Apprentissage Aux Arts Et Métiers Paristech - aménagement et programmation de laboratoires d'apprentissage," 2018.
- [19] IKIGAI Games, "[IKIGAI Games](#)" Association Games for Citizens. (Accès 2022)
- [20] ENSAM, "Memotvit". FR Patent INPI 4887591, 19 août 2022.
- [21] Ministère de l'ESR, "[Passion Enseignement et Pédagogie dans le Supérieur, PRix 2019](#)" (Acès 2022)

# Conception de séquences pédagogiques immersives en Lean Manufacturing : proposition de méthode et retour d'expérience

Anthony Quenehen<sup>a,\*</sup>, Ana Sofia Gonçalves<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Arts et Métiers, LISPEN, 8 bvd Louis 14 – 59800 Lille

\* anthony.quenehen@ensam.eu

## 1. INTRODUCTION ET OBJECTIF

Le Lean Manufacturing se repose sur un ensemble articulé de principes (ex : « juste à temps », flux pièce à pièce) méthodes (lissage de charge, élimination des inefficiences) et outils (travail standardisé, équilibrage de charge...), dont seule une mise en œuvre structurée permet d'obtenir une performance industrielle prolongée. En outre, une des composantes essentielles de son succès repose sur une posture managériale ouverte accompagnant les initiatives des opérateurs pour améliorer leur process. Aussi, il nous est apparu intéressant d'imaginer et de développer des séquences pédagogiques à même de rendre compte de ces mécanismes, en y incluant la dimension interpersonnelle. Ces séquences ont été créées autour d'un processus d'assemblage manuel d'un vérin pneumatique sur une ligne flexible.

## 2. STRATEGIE DE CONCEPTION

Nous nous sommes inspirés des méthodes de recherche orientée conception [1], dont la composante itérative des mises à l'essai semble utile pour bâtir des séquences où les étudiants pourront faire preuve d'autonomie [2] [3]. Ces processus présentent des similitudes avec ceux proposés dans le développement de 'Learning Game' (environnement et expérience où les connaissances à transmettre sont naturellement sous-jacentes et en cohérence avec l'attitude adoptée par les joueurs) [4]. Nous avons donc aussi cherché à intégrer certains ressorts ludiques afin de renforcer l'engagement des étudiants dans les séquences. Le processus de conception s'articule autour de 3 phases : cadrage, séquençage, **mise à l'essai**, cette dernière menant à la validation du projet (le détail est donné en Figure 1 :

présentation du processus général). Tout au long de ce processus, il est important de considérer simultanément le scénario pédagogique (qui sécurise l'atteinte des acquis d'apprentissage), et l'environnement qui permet sa mise en œuvre. Ce dernier élément comprend l'environnement physique avec lequel les étudiants vont interagir, mais aussi l'ensemble des règles et mécanismes qui le régissent. La vue d'ensemble est présentée dans le Tableau 1: Synthèse des éléments pédagogiques et leur implémentation.

### 2.1. Phase de cadrage

Il s'agit de définir, et vérifier la cohérence des éléments de lean manufacturing qui vont être mis en jeu avec l'environnement physique dans lequel les étudiants vont évoluer. Certains arbitrages peuvent intervenir en fonction des moyens disponibles (voir Figure 1: présentation du processus général).

#### 2.1.1. Cadrage pédagogique

Pour favoriser l'engagement des apprenants dans une séquence pédagogique ouverte, Brousseau [5] invite à maintenir des points d'équilibre sur les niveaux de contrôle (niveau d'incertitude à intégrer dans la prise de décision), l'ajustement entre la récompense-ici la performance économique obtenue- et les efforts consentis, ainsi que le rythme auquel ces récompenses sont obtenues. Ces principes nous ont poussé à imaginer une séquence ouverte basée sur une succession de campagnes de productions (appelées 'run') à réaliser par les apprenants. L'objectif fixé est en apparence simple : abaisser le coût de revient de l'assemblage d'un produit. Cet objectif doit être bien entendu inatteignable dès la situation de départ, mais il peut l'être (et même dépassé) une fois les différentes notions lean mises en œuvre dans



Tableau 1: Synthèse des éléments pédagogiques et leur implémentation

Eléments pédagogiques	Scénarisation	Environnement	Phase		Commentaires	KPI associé
			Cadrage	Séquençage		
1-piece-flow	Passage job shop -> flow shop	Stations reconfigurables mobiles	✓			Lead Time Work in Process
Elimination Muda (inefficacités) : stagnation, attente, transport	Caractériser la part de Muda dans la performance	Distance entre les postes Déséquilibrer la charge de travail		✓		Taux occupation Cycle Time (CT) Lead Time
Production au rythme du client (Takt Time -TT)	Performance via économie de ressources	Produit entraîné par convoyeur réglable	✓		/ \ Sécurité, coût et modularité	TT Taux de charge
Amélioration (kaizen) via PDCA (Plan Do check Act) - éviter l'amélioration de la perf. par l'accélération de la cadence.	Processus réflexif sur la performance obtenue : itération de campagnes de production avec prédiction	Forcer la rotation des opérateurs Atteinte rapide de temps opératoires optimaux	✓	✓	Produit avec peu de pièces déformables pour un apprentissage rapide	
Interactions managériales, recherche de cause systémique Promotion des initiatives des opérateurs	Rôles superviseur/opérateur Temps de résolution collégial entre chaque campagne	Alterner les rôles Intégrer un document de remontées de kaizen	✓	✓		
Sécuriser la qualité comme socle d'amélioration des coûts		Le produit doit permettre des erreurs d'assemblage	✓		Le coût de l'erreur empêche d'atteindre l'objectif visé	Pénalité et coût de réparation
Privilégier l'amélioration globale à l'amélioration locale Piloter par objectif	Introduire des cartes 'booster' qui symbolisent des investissements industriels	La performance économique est une fonction de la qualité, l'utilisation de la main d'œuvre et du WIP	✓	✓	Etablir ce principe dès l'introduction de la séquence	Coût interne unitaire du produit

Le choix s'est reporté sur un convoyeur passif, et l'économie de ressource a été illustrée par le 'makespan' (durée totale de mobilisation des opérateurs). Concernant le produit, le choix s'est porté sur un vérin pneumatique.

Les avantages principaux étant d'avoir essentiellement des pièces rigides (peu d'effet de la dextérité sur l'amélioration de la cadence d'assemblage), et la possibilité d'intervenir ou de mal positionner certains de ses composants, générant donc des défauts (une vue éclatée du vérin est présente sur la partie 'cadrage', Figure 1: présentation du processus général).

## 2.2. Phase de séquençage

Le cadre établi, il reste à dessiner la progression des étudiants. Le choix pédagogique initial impose d'avoir plusieurs chemins possibles. L'objectif de cette phase est de les tracer d'un point de vue pédagogique, et d'aménager l'environnement (à ce stade l'ensemble des règles et mécanismes régissant le système) pour qu'ils apparaissent plus ou moins évidents aux étudiants.

### 2.2.1. Séquençage pédagogique

L'objectif pédagogique est que les apprenants perçoivent l'intérêt de la mise en place de méthodes lean en termes de performance, ainsi que l'ordre à respecter et les points d'attention pour une implémentation efficace. La première étape consiste à définir un chemin dit 'préférentiel', ou idéal. Le point de départ est un système peu efficace dans notre cas : un job shop travaillant par lot, dont les 3 postes de travail possèdent des charges de travail disparates. L'objectif de l'activité est de le transformer **en flow shop**, organisé en '**one-piece-flow**' (flux pièce à pièce), dont la **charge de travail est répartie de façon homogène**. La séquence est constituée

de deux phases principales, représentées par le chemin A (voir Figure 4: cartographie de la séquence) :

1. Mise en flux du système (connexion des postes et taille de lot = 1)
2. Sur la base de ce système plus observable (moins de stagnation), rééquilibrage de la charge de travail.

Le dilemme sous-jacent est que ces 3 transformations disponibles sous forme de carte 'booster' nécessitent 2 runs de production (2 cartes par run autorisées), d'où une priorisation à effectuer. Un des objectifs de notre développement est que les 'voies sans issues' (qui améliorent trop peu la performance) aient aussi un intérêt pédagogique. Il a donc été nécessaire de les rendre suffisamment 'tentantes' pour les apprenants, bien qu'une analyse plus fine de la situation permette de les éviter. Ces chemins alternatifs (chemins B et C, Figure 4: cartographie de la séquence) sont donc aussi liés à des notions lean. D'autre part l'environnement a aussi été adapté pour qu'un choix peu judicieux ne soit pas rédhibitoire, et que la performance finale puisse être obtenue au prix d'un effort de préparation supplémentaire pour le run suivant.

### 2.2.2. Ajustement de l'environnement

A ce stade, les mécanismes ludiques jouent un rôle prépondérant pour accompagner la progression des étudiants, sur deux composantes :

1. Le chemin parcouru vers l'objectif global de performance
2. L'orientation à prendre pour le prochain run

Sur le premier point, une formule de calcul est partagée pour que chaque groupe évalue lui-même sa performance. Il est important que la cible finale ne puisse être atteinte si les critères pédagogiques ne sont pas

remplis. Cette valeur cible exprimée en €/unité est donc compromise si un seul défaut qualité est généré (pénalité client), ou encore si l'équilibrage des postes de travail présente un écart de 25% (à ce moment le poste goulot génèrera un makespan qui fera passer le coût de main d'œuvre au-dessus de la valeur cible pour l'intégralité du coût). Il est intéressant à ce stade de disposer d'un produit modulaire dont on peut jouer sur la nomenclature pour modifier la difficulté d'assemblage conforme ou d'équilibrage homogène.

entre les postes, des packagings en quantité pour tester différentes tailles de lot lors des essais.

Plusieurs essais ciblés permettent d'avoir une pré-validation de la cartographie de l'environnement et des parcours susceptibles d'être emprunté par les étudiants. Il est alors temps de passer à la mise à l'essai avec des groupes cibles.

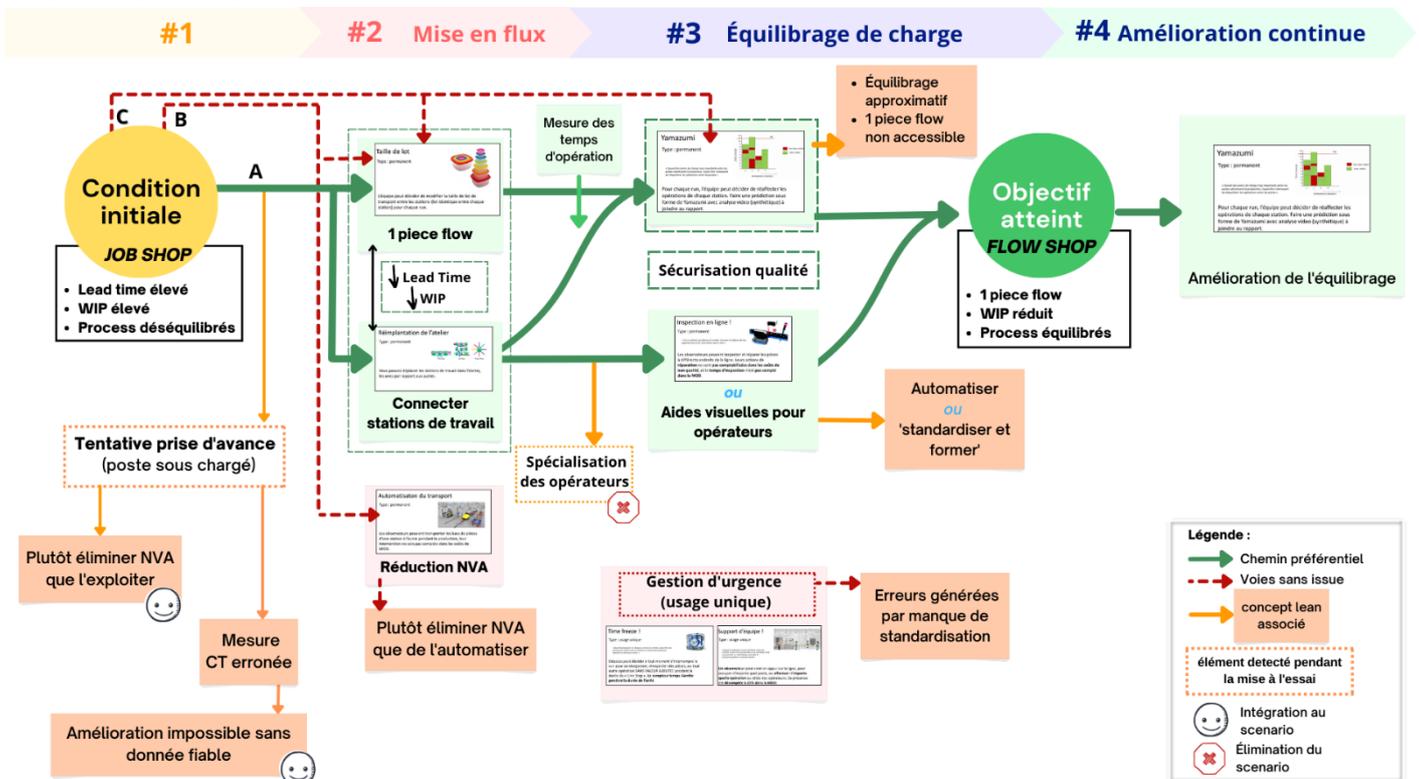


Figure 4: cartographie de la séquence

L'orientation des choix est l'occasion de récompenser une analyse plus poussée de la part d'un groupe. Par exemple, entre les chemins A et C (Figure 4: cartographie de la séquence), les ajustements des critères de coût font qu'en général le gain sur l'attente des opérateurs (chemin C), dû au déséquilibre de charge, soit proche de celui généré par la réduction de la taille de lot à 1, via son gain sur le Lead Time (et donc de la durée du run), à condition d'être couplé à la connexion des postes pour éviter la perte due aux déplacements (chemin A). Une analyse plus poussée permettrait de conclure que, ne disposant pas à ce stade de valeurs pour les temps de chaque opération, un rééquilibrage ne peut être qu'approximatif, et qu'une baisse de taille de lot sera négativement compensée par l'augmentation du temps total de transport entre les stations. Ce type de situation, si elle est pédagogiquement très intéressante à exploiter, requiert une préparation relativement fastidieuse pour assurer que les étudiants l'identifient. Là encore, il est utile d'avoir un environnement modifiable sur plusieurs caractéristiques: outre la modularité du produit, par exemple une surface suffisante pour ajuster la distance

### 2.3. Mise à l'essai

Les premiers groupes vont pouvoir expérimenter la séquence complète, sans instruction préalable. Dans une approche d'amélioration itérative, cette phase a le double objectif de confirmer la robustesse de la conception et de capter en condition réelle des événements ou comportements qui n'auraient pas été anticipés. Il convient de distinguer les éléments signifiants de ceux qui ne le sont pas (voir Figure 4: cartographie de la séquence).

Les premiers correspondent à une problématique transposable dans un environnement réel, liée aux concepts visés. Ils peuvent alors enrichir la séquence, modulo quelques ajustements supplémentaires, ou plus simplement par de nouvelles interactions entre étudiants et animateurs. Par exemple, lors des premiers essais, les étudiants affectés aux postes de travaux sous chargés ont eu tendance à occuper leur temps d'attente en réalisant des sous assemblages de composants pour 'prendre de l'avance'. Ceci renvoie opportunément à plusieurs notions, et les animateurs ont pu inviter les étudiants à se questionner sur les impacts de cette pratique: impossibilité de mesurer un temps de cycle fiable (ce qui

va compromettre le rééquilibrage à venir), consommation anticipée de composants (déséquilibre du flux d'approvisionnement), encombrement du poste de travail et possible confusion en cas de rotation d'opérateur... D'où la possibilité, par l'expérience vécue, de renforcer un enseignement du lean qui pousse à éliminer les causes des inefficiences (ici l'attente due au déséquilibre), plutôt que de composer avec.

A contrario, certains éléments apparaissent du fait des limites de l'environnement pédagogique : par exemple les temps d'exécution des opérations s'améliorent continuellement pendant la séance, du fait de la durée limitée des runs de production, la courbe d'apprentissage n'est pas encore dans sa partie stabilisée. Ceci n'étant pas un facteur d'amélioration recherché, il a fallu introduire des mécanismes pour l'éviter : une période de rodage avant les premiers runs, puis une contrainte de rotation régulière sur les postes (justifiée auprès des étudiants par un souci d'ergonomie en vie réelle).

Cette étape sert aussi donc à ajuster la posture des encadrants, voire sert même de base de formation. Des évaluations formatives sont réalisées conjointement par les encadrants et étudiants, notamment pour obtenir leur ressenti sur l'intérêt de la séquence, l'engagement étant une des clés de son succès. Lors d'une de ces évaluations, il a été décidé par exemple de réduire la quantité de pièce à produire par run pour atténuer un sentiment de répétitivité (les étudiants doivent aussi démonter chaque pièce assemblée entre les runs), même si cet élément reste signifiant pour le sujet abordé. Une fois la séquence jugée suffisamment robuste et à même de permettre aux étudiants d'atteindre les objectifs, le déploiement peut prendre place.

#### 2.4. Validation et mise en service

Cette phase comprend la finalisation des documents nécessaires (support de compte rendu, gammes de travail, feuilles de calculs...), mais aussi la préparation d'une présentation de lancement de la séquence qui va 'planter le décor' pour renforcer l'appropriation des objectifs. Les modalités d'évaluation sont aussi définies, même si elles évolueront encore pendant quelques séances, le temps d'obtenir une image plus complète de la progression d'un ensemble de groupes représentatifs. Dans tous les cas, elles sont données en début de session, pour soutenir la volonté de pilotage par objectif qui caractérise ce travail. Cela peut être l'occasion aussi de figer le travail préparatoire que les étudiants réaliseront en autonomie, soit pour couvrir des points qui ne peuvent être joués lors de la séance (dans notre cas une ligne entraînée par un convoyeur, régie par un Takt Time), ou pour décharger la séquence d'un ensemble de tâches qui peuvent être faites en amont.

Il peut être aussi nécessaire de former de nouveaux encadrants, non seulement sur les notions pédagogiques cibles, mais aussi sur la posture à tenir face aux étudiants pour les accompagner via un questionnement pertinent, en dosant la quantité d'apport pour favoriser leur succès tout en leur laissant suffisamment de libre arbitre pour

que la séance reste engageante. Dans une recherche d'amélioration continue de la séquence, des retours de perception sont aussi sollicités, créant ainsi une continuité entre la séquence elle-même et son contenu auprès des étudiants.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

Cette séquence est maintenant en place depuis 3 semestres, sous forme de de Travaux Pratiques en première année de cycle ingénieur sur le campus Arts et Métiers de Lille (voir Figure 5 : Séance de Travaux Pratiques en cours). Les ajustements effectués dans les différentes phases permettent d'obtenir un taux de réussite légèrement supérieur à 90%. Concernant le choix entre les chemins A et C (voir Figure 4: cartographie de la séquence), un élément pédagogique important, le chemin préférentiel (A) est emprunté par environ 40% des groupes, ce qui est satisfaisant. En termes d'engagement, ces travaux pratiques sont cités spontanément par 65% des étudiants comme un point positif de l'unité d'enseignement dont ils font partie (panel d'un tiers des étudiants). Les verbatim soulignent l'aspect immersif, dynamique et enrichissant de la séquence.



Figure 5 : Séance de Travaux Pratiques en cours

Outre ces résultats encourageants, nous pouvons tirer plusieurs éléments de ce type de développement. Tout d'abord, il permet à l'enseignant d'adopter une posture d'accompagnant vis-à-vis des étudiants, les incitant à développer une attitude réflexive, soit pour rechercher les causes d'un échec ou structurer explicitement les facteurs de succès mis en jeu.

En termes de contenu, la quantité de notions abordées est supérieure, et pour certaines la qualité est supérieure car elle passe par une expérience sensible (avec parfois un engagement émotionnel) plutôt qu'une explication théorique, même illustrée. Cela est réalisable au prix d'un effort sur la maquette pédagogique, car la transformation en Travaux Pratiques a nécessité un doublement des heures allouées.

Cette expérience vécue présente aussi l'avantage de servir de socle de référence pour les enseignements ultérieurs, et peut être régulièrement citée pour des problématiques de logistique interne par exemple.

Des points de retour d'expérience ont aussi mis en évidence sur le processus de conception. Concernant l'environnement physique, le plus réaliste possible est à

privilegier, malgré l'investissement financier qu'il peut représenter. En effet, dans les premières phases de conceptions, certains choix peuvent paraître incertains et coûteux, mais ils se révèlent pertinents ensuite car ils permettent de provoquer et d'intégrer un grand nombre de phénomènes signifiants lors des phases d'essais. Une recommandation pourrait être de se faire éventuellement accompagner par un partenaire industriel en cas de doute.

L'implication des étudiants peut encore être anticipée dès les phases de cadrage et séquençage, avec un groupe projet permanent, dans l'idée de ne pas avoir à préjuger de leur réaction dans un milieu ouvert. Ceci a été mis en place dans un nouveau projet analogue, et ils sont à l'origine de plusieurs éléments scénaristiques majeurs de la séquence en construction.

#### 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article présente un retour d'expérience sur une construction de séquence pédagogique immersive, et tente d'établir un processus de conception qui permette d'atteindre des objectifs ambitieux de qualité de transmission et d'engagement des étudiants. Les aspects expérimentaux et incrémentaux apparaissent essentiels dans le succès de cette démarche. Mettre les encadrants en posture d'accompagnant doit pouvoir permettre, en ajustant leur niveau d'intervention, d'accueillir des publics de différents niveaux.

La sélection d'un environnement réaliste permet aussi d'enrichir les expérimentations, et de croiser les thématiques. Aujourd'hui des travaux en cours visent à intégrer des robots collaboratifs sur certains postes, ce qui étend l'utilisation de l'environnement à d'autres unités d'enseignement, et renforce la continuité du cursus.

Cette communication a pour objectif de partager cette pratique avec des collègues intéressés par des projets similaires en Gestion Industrielle, dans un but d'enrichissement mutuel, mais aussi à d'autres domaines d'enseignement pour tester le processus de conception et en développer sa transposabilité.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier la Fondation Arts et Métiers, pour la confiance qui leur ont accordé en finançant l'achat des moyens pédagogiques, et leur engagement continu de ce projet de développer des séquences pédagogiques innovantes. Notre reconnaissance va aussi à l'équipe enseignante de Gestion Industrielle du campus Arts et Métiers d'Aix en Provence, dont le soutien et le partage d'expérience nous ont fait gagner un temps précieux dans le déroulement de ce projet.

#### RÉFÉRENCES

- [1] S. & L. J. Harvey, «Proposition d'un modèle de recherche développement.» *Recherches qualitatives*, vol. 28, pp. p. 95-117, 2009.
- [2] D. Euler, «Design Research-a paradigm under development.» (2014)..
- [3] S. N. N. & v. d. A. J. .. McKenney, «Design research from a curriculum perspective. In Educational design research.,» chez *Educational design research*, Routledge, 2006, pp. pp. 79-102.
- [4] M. M. N. L. J. M. & G. G. Vermeulen, «Vers une approche Meta-Design des Learning Games avec le modèle DISC: de la conception à l'analyse des traces d'usage des étudiants par les enseignants.» *STICEF (Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation)*, vol. 25, 2018.
- [5] B. G., «BROUSSEAU, Guy. Le contrat didactique: le milieu.» *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. vol. 9, pp. p. 309-336, 1990.